

**UNIVERSIDADE DE LISBOA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**ESTUDO DE MISTURAS DE FINOS DE  
PEDREIRAS DE GRANITO COM BENTONITE  
PARA CONFINAMENTO HIDRÁULICO DE  
OBRAS GEOTÉCNICAS COM FUNÇÕES  
AMBIENTAIS**

**João Guilherme Olim Guerra**

**MESTRADO EM GEOLOGIA APLICADA**  
**(Especialização em Geologia da Engenharia)**

**2010**

**UNIVERSIDADE DE LISBOA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**ESTUDO DE MISTURAS DE FINOS DE PEDREIRAS  
DE GRANITO COM BENTONITE PARA  
CONFINAMENTO HIDRÁULICO DE OBRAS  
GEOTÉCNICAS COM FUNÇÕES AMBIENTAIS**

**João Guilherme Olim Guerra**

Tese orientada por:

**Doutor António José Roque** (orientador: Investigador Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

**Doutora Isabel Moitinho de Almeida** (co-orientadora: Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa)

**MESTRADO EM GEOLOGIA APLICADA**  
**(Especialização em Geologia da Engenharia)**

**2010**



# **ESTUDO DE MISTURAS DE FINOS DE PEDREIRAS DE GRANITO COM BENTONITE PARA CONFINAMENTO HIDRÁULICO DE OBRAS GEOTÉCNICAS COM FUNÇÕES AMBIENTAIS**

## **RESUMO**

No âmbito dum Protocolo celebrado entre o LNEC e o Grupo Mota-Engil (Grupo ME), está em curso um programa de investigação, no qual também participa a FCUL, que tem por objectivo a valorização dos finos de duas pedreiras de granito do Grupo ME, em infraestruturas de transportes e obras geotécnicas. Os resultados já obtidos mostram que a condutividade hidráulica,  $k$ , embora baixa, não é suficiente para viabilizar a sua reciclagem na construção de barreiras de confinamento hidráulico, onde o valor mínimo requerido é  $k \leq 1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ .

Tendo em vista a avaliação da viabilidade da aplicação dos finos na construção destas barreiras, na presente dissertação é estudado o melhoramento da capacidade de confinamento hidráulico destes materiais após tratamento com pequenas percentagens de bentonite (2%, 4% e 6%).

Na recolha bibliográfica efectuada não foram encontrados estudos sobre o desempenho hidráulico de misturas de finos de pedreira com bentonite, embora existam com solos naturais, principalmente areias.

O programa experimental começou por contemplar o estudo das propriedades índice (composição granulométrica e limites de consistência) e físicas (qualidade dos finos, expansibilidade e relação peso volúmico seco - teor em água de compactação) das misturas. A avaliação do melhoramento do desempenho hidráulico das misturas em relação ao dos finos, envolveu o estudo da  $k$  de doze provetes, seis de cada uma das pedreiras, compactados com teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo, pelos métodos Proctor normal e modificado. A observação ao microscópio electrónico de varrimento permitiu caracterizar a microestrutura das misturas e dos finos de uma das pedreiras.

Os resultados obtidos evidenciam que o melhoramento do desempenho hidráulico dos finos com a bentonite é mais eficiente com os da pedreira de Famalicão do que com os da pedreira de Cervães e que só nas misturas de Famalicão é atingido o objectivo proposto.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Finos de pedreiras; Bentonite; Misturas; Condutividade hidráulica; Barreiras de confinamento

# **STUDY OF GRANITE QUARRY FINES-BENTONITE MIXTURES FOR HYDRAULIC CONTAINMENT OF GEOTECHNICAL WORKS WITH ENVIRONMENTAL FUNCTIONS**

## **SUMMARY**

An ongoing research program, under a Protocol established between LNEC and Mota-Engil Company (ME Company), in which FCUL also participates, intends the recycling of fine grained-materials from two granite quarries of ME Company for application in the construction of transport infrastructures and geotechnical works. The results obtained so far show that their hydraulic conductivity,  $k$ , is low but not enough for application in the construction of hydraulic barriers, where the minimum required is  $k \leq 1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ .

In order to assess the feasibility of applying those fine-grained materials on the construction of such barriers, this thesis focuses on the improvement of the hydraulic containment capacity of these materials after treatment with small percentages of bentonite (2%, 4% and 6%).

A review of the available literature has yielded no studies on the hydraulic performance of quarry fines with bentonite, although there are studies using natural soils, especially sands.

The experimental program started with the study of the index properties (particle size distribution and consistency limits) and physical properties (blue methylene adsorption, swelling and unit weight of dry soil – moisture content of compaction) of the mixtures. Comparative assessment of the improvement of the hydraulic performance of the mixtures and the fine-grained materials from the quarries involved the study of the  $k$  parameter for twelve specimens, six from each quarry, compacted with moisture content 2% below the optimum moisture content, according to both standard and modified Proctor methods. Scanning electron

microscopy has made possible the study of the microstructure of both the mixtures and the fine-grained materials from one of the quarries.

The data obtained show that the improvement of hydraulic performance of the fine-grained materials with the bentonite is more efficient in the Famalicão quarry fines than in the Cervães quarry fines, so the aim of the present study can only be achieved in the mixtures from Famalicão quarry fines.

### **KEY-WORDS**

Quarry fines; Bentonite; Mixtures; Hydraulic Conductivity; Hydraulic barriers

# ÍNDICE

## INTRODUÇÃO GERAL

JUSTIFICAÇÃO DO TEMA.....	1
OBJECTIVOS.....	4
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5

## CAPÍTULO 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1.INTRODUÇÃO.....	7
1.2.MINERAIS ARGILOSOS.....	7
1.2.1. Introdução.....	7
1.2.2. Estrutura dos minerais argilosos cristalinos.....	9
1.2.2.1. Grupo da caulinite.....	10
1.2.2.2. Grupo da illite.....	11
1.2.2.3. Grupo da esmectite.....	12
1.2.2.4. Grupo da clorite.....	13
1.2.2.5. Grupo da vermiculite.....	14
1.2.2.6. Grupo dos interestratificados.....	15
1.2.2.7. Grupo da paligorskite e sepiolite.....	16
1.3.BENTONITES.....	18
1.3.1. Introdução.....	18
1.3.2. Tipos e aplicações das bentonites.....	19



1.3.3. Propriedades das bentonites.....	21
1.3.3.1. Superfície específica.....	21
1.3.3.2. Capacidade de troca catiónica.....	22
1.3.3.3. Dupla camada eléctrica.....	23
1.3.3.4. Expansibilidade.....	24
1.3.3.5. Tixotropia.....	25
1.3.3.6. Plasticidade.....	26
1.3.4. Compatibilidade da bentonite com soluções aquosas.....	27
<b>1.4. TEOR EM ÁGUA DE COMPACTAÇÃO. SUA INFLUÊNCIA NA PERMEABILIDADE DOS SOLOS.....</b>	<b>32</b>
<b>1.5. ESTUDOS LABORATORIAIS. CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS SOLO-BENTONITE E DO SEU COMPORTAMENTO HIDRÁULICO.....</b>	<b>36</b>
<b>1.6. ESTUDOS <i>IN SITU</i>. DESEMPENHO HIDRÁULICO DE BARREIRAS DE CONFINAMENTO CONSTRUÍDAS COM MISTURAS SOLO-BENTONITE.....</b>	<b>61</b>
<b>1.7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>

## **CAPÍTULO 2.PROGRAMA EXPERIMENTAL**

<b>2.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>75</b>
<b>2.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DAS MISTURAS.....</b>	<b>78</b>
2.2.1. Finos das pedreiras.....	78
2.2.1.1. Enquadramento geológico regional e local das pedreiras.....	78

2.2.1.2. Amostragem e preparação das amostras.....	79
2.2.1.3. Propriedades dos finos.....	80
2.2.2. Bentonite sódica.....	83
2.2.3. Preparação das amostras das misturas.....	86
<b>2.3. PROPRIEDADES ÍNDICE DAS MISTURAS.....</b>	<b>86</b>
2.3.1. Composição granulométrica.....	87
2.3.2. Limites de consistência.....	87
2.3.3. Classificação geotécnica das misturas.....	88
2.3.4. Análise comparativa das propriedades índice das misturas e dos finos das pedreiras.....	93
<b>2.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DAS MISTURAS.....</b>	<b>96</b>
2.4.1. Qualidade dos finos (ensaio do azul de metileno).....	96
2.4.2. Expansibilidade livre.....	97
2.4.3. Compactação.....	100
2.4.4. Análise comparativa das propriedades físicas das misturas e dos finos das pedreiras.....	102
<b>2.5. ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....</b>	<b>106</b>
2.5.1. Equipamento.....	106
2.5.2. Preparação e propriedades físicas iniciais dos provetes das misturas.....	109
2.5.3. Percolação dos provetes das misturas.....	114
2.5.4. Condutividade hidráulica e propriedades físicas finais dos provetes das misturas.....	117

2.5.4.1. Misturas dos finos de FML com bentonite.....	117
2.5.4.2. Misturas dos finos de CRV com bentonite.....	128
2.5.5. Análise comparativa da condutividade hidráulica das misturas e dos finos das pedreiras.....	139
<b>2.6. OBSERVAÇÃO DA MICROESTRUTURA DOS PROVETES DAS MISTURAS E DOS FINOS DAS PEDREIRAS AO MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO.....</b>	<b>141</b>
2.6.1. Introdução.....	141
2.6.2. Noções básicas sobre microscopia electrónica de varrimento.....	142
2.6.3. Preparação das amostras a observar.....	146
2.6.4. Observação da microestrutura.....	148
<b>2.7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>155</b>
 <b>CAPÍTULO 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	 <b>159</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	 <b>163</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 1.1 -	Representação esquemática de: (a) um tetraedro; (b) uma folha tetraédrica; (c) um octaedro, em que o átomo coordenado pode ser Al - alumínio, Fe - ferro ou Mg - magnésio; (d) uma folha octaédrica (adaptado de Gomes, 1986).....	10
Figura 1.2 -	Modelo esquemático da estrutura química da Caulinite: O - oxigénio; OH - hidróxido; Al - alumínio; Si - silício (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	11
Figura 1.3 -	Modelo esquemático da estrutura química da Illite: O - oxigénio; OH - hidróxido; K - potássio; Al - alumínio; Mg - magnésio; Fe - ferro; Si - silício (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	12
Figura 1.4 -	Modelo esquemático da estrutura química da Montmorilonite: O - oxigénio; OH - hidróxido; Si - silício; Al - alumínio; Fe - ferro; Mg - magnésio (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	13
Figura 1.5 -	Modelo esquemático da estrutura química da Clorite: O - oxigénio; OH - hidróxido; Mg - magnésio; Fe - ferro; Si - silício; Al - alumínio (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	14
Figura 1.6 -	Modelo esquemático da estrutura química da Vermiculite: O - oxigénio; Mg - magnésio Si - silício; Al - alumínio; Fe - ferro (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	15
Figura 1.7 -	Modelo simplificado de estruturas dos minerais interestratificados (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	16
Figura 1.8 -	Modelo esquemático da estrutura química da Paligorsquite: H <sub>2</sub> O - água; OH <sub>2</sub> - OH - hidróxido; O - oxigénio; Mg - magnésio; Al - alumínio; Si - silício (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	17

Figura 1.9 -	Modelo esquemático da estrutura química da Sepiolite: OH <sub>2</sub> -; H <sub>2</sub> O - água; O - oxigénio; OH - hidróxido; Mg - magnésio; Si - silício (Poppe <i>et al.</i> , 2001).....	17
Figura 1.10 -	Quatro estados do comportamento de um solo, em função do teor em água, e relação com a tensão-deformação (adaptado de Das, 2006).....	26
Figura 1.11 -	Efeito do teor em água de compactação: (a) no peso volúmico seco; e (b) na condutividade hidráulica (adaptado de Daniel e Koerner, 1995).....	32
Figura 1.12 -	Relação entre a condutividade hidráulica e o teor em água de um solo compactado estática e dinamicamente (Daniel e Koerner, 1995).....	33
Figura 1.13 -	Influência do teor em água de compactação na estrutura dos solos argilosos compactados (Lambe, 1958; adaptado de Lukiantchuki, 2007).....	34
Figura 1.14 -	Influência dos torrões na permeabilidade dos solos (após Herrmann e Elsbury, 1987; <i>in</i> Moussai, 1993).....	35
Figura 1.15 -	Factores e processos que podem influenciar a condutividade hidráulica de uma barreira de confinamento construída a partir de uma mistura solo-bentonite (adaptado de Buettner, 1985).....	39
Figura 1.16 -	Condutividade hidráulica de uma mistura solo-bentonite versus teor em bentonite (Daniel, 1993; adaptado de Lukiantchuki, 2007).....	40
Figura 1.17 -	Permeâmetro de parede rígida utilizado por Chalermyanont e Arrykul (2005).....	44

Figura 1.18 -	Condutividade hidráulica de misturas de areia com bentonite cálcica e com bentonite sódica, percoladas com água da rede, em função do respectivo teor em bentonite (adaptado de Gleason <i>et al.</i> , 1997).....	47
Figura 1.19 -	Comparação da percentagem de bentonite cálcica e sódica misturada com o mesmo tipo de areia para se atingir uma condutividade hidráulica inferior a $1 \times 10^{-9}$ m/s, em provetes percolados directamente com uma solução de 0,25 M $\text{CaCl}_2$ (adaptado de Gleason <i>et al.</i> , 1997).....	48
Figura 1.20 -	Condutividade hidráulica das misturas da areia siltosa com a bentonite <i>versus</i> o teor em bentonite, compactadas com teor em água óptimo Proctor modificado (adaptado de Magistris <i>et al.</i> , 1998).....	53
Figura 1.21 -	Relação entre a condutividade hidráulica e a percentagem de bentonite nas diferentes misturas estudadas (adaptado de Sivapullaiah <i>et al.</i> , 2000).....	59
Figura 1.22 -	Permeâmetro utilizado nos ensaios de permeabilidade com montagem do provete da mistura areia-bentonite de compactação (adaptado de Alston <i>et al.</i> , 1997).....	62
Figura 1.23 -	Caso B, barreira com solo-bentonite: fuga total adimensional da lagoa 2 (adaptado de Chapuis, 2002).....	69
Figura 1.24 -	Condutividade hidráulica das misturas <i>versus</i> percentagem em bentonite, <i>in situ</i> (adaptado de Bonaparte <i>et al.</i> , 2002).....	70
Figura 1.25 -	Condutividade hidráulica do solo <i>versus</i> teor em água em relação ao teor em água óptimo, <i>in situ</i> (adaptado de Bonaparte <i>et al.</i> , 2002).....	71
Figura 1.26 -	Condutividade hidráulica das misturas <i>versus</i> grau de compactação, <i>in situ</i> (adaptado de Bonaparte <i>et al.</i> , 2002).....	71

## CAPÍTULO 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Figura 2.1 -	(a) Finos da pedreira do Moinho de Vento, Famalicão (FML); (b) finos da pedreira de Bouça do Menino, Cervães (CRV).....	78
Figura 2.2 -	Bentonite sódica natural utilizada nos ensaios.....	84
Figura 2.3 -	Curvas granulométricas dos finos da pedreira de FML, sem e com bentonite.....	89
Figura 2.4 -	Curvas granulométricas dos finos da pedreira de CRV, sem e com bentonite.....	91
Figura 2.5 -	Relação entre a percentagem de bentonite e o limite de liquidez ( $w_L$ ) e entre a percentagem de bentonite e o índice de plasticidade ( $I_P$ ) das misturas finos-bentonite e dos finos das pedreiras.....	95
Figura 2.6 -	Curvas de compactação dos finos FML+%bentonite, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).	100
Figura 2.7 -	Curvas de compactação dos finos CRV+%bentonite, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).	101
Figura 2.8 -	Comparação dos valores do azul de metileno das misturas finos-bentonite com os valores do azul de metileno dos finos das pedreiras.....	103
Figura 2.9 -	Comparação da expansibilidade livre das misturas finos- bentonite com a dos finos das pedreiras, segundo os dois métodos.....	104
Figura 2.10 -	Comparação do peso volúmico seco máximo das misturas finos-bentonite com o dos finos das pedreiras, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).....	105

Figura 2.11 -	Comparação do teor em água óptimo das misturas com o dos finos das pedreiras, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).....	105
Figura 2.12 -	Permeâmetro de parede rígida utilizado nos ensaios de permeabilidade.....	107
Figura 2.13 -	Vista interna de um permeâmetro de parede rígida.....	107
Figura 2.14 -	Reservatório em acrílico para armazenamento da solução influente.....	108
Figura 2.15 -	Reservatórios para recolha da solução efluente.....	109
Figura 2.16 -	Anel e alonga utilizados na compactação dos provetes.....	111
Figura 2.17 -	Proвете de ensaio compactado no anel de aço.....	112
Figura 2.18 -	Representação dos provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade, preparados a partir da mistura dos finos de FML com as três percentagens de bentonite, pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado.....	113
Figura 2.19 -	Representação dos provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade, preparados a partir da mistura dos finos de CRV com as três percentagens de bentonite, pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado.....	113
Figura 2.20 -	Condutividade hidráulica das misturas dos finos de FML com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.....	121
Figura 2.21 -	pH e condutividade eléctrica das misturas dos finos de FML com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.....	123



Figura 2.22 -	Base do provete da mistura dos finos de FML com 6% de bentonite, no final do ensaio de permeabilidade, antes da remoção do papel de filtro.....	127
Figura 2.23 -	Base do provete da mistura dos finos de FML com 6% de bentonite, no final do ensaio de permeabilidade, após a remoção do papel de filtro.....	128
Figura 2.24 -	Condutividade hidráulica das misturas dos finos de CRV com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.....	131
Figura 2.25 -	pH e condutividade eléctrica das misturas dos finos de CRV com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.....	133
Figura 2.26 -	Topo do provete da mistura dos finos de CRV com 2% de bentonite, $w_{opn-2\%}$ , no final do ensaio de permeabilidade, com o papel de filtro.....	138
Figura 2.27 -	Base do provete da mistura dos finos de CRV com 4% de bentonite, $w_{opn-2\%}$ , antes da remoção do papel de filtro.....	138
Figura 2.28 -	Condutividade hidráulica dos finos das pedreiras e das misturas finos-bentonite, em função da percentagem de bentonite.....	140
Figura 2.29 -	Esquema da estrutura do MEV e modo de operação (adaptado de Moreira de Sá, 2006).....	144
Figura 2.30 -	Microscópio electrónico de varrimento ambiental do CEMUP.....	145
Figura 2.31 -	Exemplo da informação existente nas imagens obtidas no MEV-A.....	145
Figura 2.32 -	(a) Porta-amostras; (b) amostra colocada no porta-amostras.....	147

Figura 2.33 -	Vista interna da câmara com a amostra para observação.....	147
Figura 2.34 -	Microestrutura dos finos de CRV e da mistura dos finos de CRV com 6% de bentonite, compactados com $w_{opn-2\%}$ , sem e após percolação.....	151
Figura 2.35 -	Microestrutura dos finos de CRV e da mistura dos finos de CRV com 6% de bentonite, compactados com $w_{opm-2\%}$ , sem e após percolação.....	153



# ÍNDICE DE QUADROS

## CAPÍTULO 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quadro 1.1 -	Valores para a superfície específica total de alguns materiais argilosos (adaptado de Roque, 2001).....	22
Quadro 1.2 -	Valores para a capacidade de troca catiónica de alguns minerais argilosos (adaptado de Roque, 2001). ....	23
Quadro 1.3 -	Valores para a expansibilidade livre de alguns materiais argilosos (adaptado de Roque, 2001). ....	25
Quadro 1.4 -	Limites de Atterberg para alguns minerais argilosos (adaptado de Lambe e Whitman, 1979). ....	27
Quadro 1.5 -	Compatibilidade do material constituinte da barreira com resíduos industriais (adaptado de Alther, 1987). ....	29
Quadro 1.6 -	Resultados dos ensaios de permeabilidade com bentonite e várias soluções percolantes (adaptado de Alther, 1987). ....	31
Quadro 1.7 -	Condutividade hidráulica das misturas obtida nos ensaios edométricos (adaptado de Ameta e Wayal, 2008). ....	41
Quadro 1.8 -	Condutividade hidráulica das misturas obtida nos ensaios de permeabilidade a carga variável (adaptado de Ameta e Wayal, 2008). ....	42
Quadro 1.9 -	Condutividade hidráulica de solos e misturas de solo-bentonite (adaptado de Boscov <i>et al.</i> , 2009). ....	43
Quadro 1.10 -	Resultados obtidos para a condutividade hidráulica das misturas das cinzas e da areia com as várias percentagens de bentonite (adaptado de Heineck <i>et al.</i> , 2003). ....	50

Quadro 1.11 - Síntese dos resultados obtidos na caracterização do solo arenoso, das misturas solo-bentonite e da bentonite (adaptado de Lukiantchuki e Esquivel, 2008).....	52
Quadro 1.12 - Resultados obtidos para a condutividade hidráulica das misturas areia-bentonite (adaptado de Marcotte <i>et al.</i> , 1994). ....	54
Quadro 1.13 - Granulometria dos três tipos de areia utilizados nas misturas com a bentonite (adaptado de Sällfors e Öberg-Högsta, 2002). ....	57
Quadro 1.14 - Resultados obtidos por Sällfors e Öberg-Högsta (2002) para a condutividade hidráulica de misturas areia-bentonite. ....	58
Quadro 1.15 - Resultados para a condutividade hidráulica das misturas finais (adaptado de Alston <i>et al.</i> , 1997). ....	63
Quadro 1.16 - Resultados obtidos nos testes de controlo de qualidade, em cada local da zona de ensaio, para a mistura de areia-bentonite (adaptado de Alston <i>et al.</i> , 1997).....	64

## **CAPÍTULO 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Quadro 2.1 - Síntese do programa experimental utilizado na determinação das propriedades das misturas. ....	77
Quadro 2.2 - Análise mineralógica semiquantitativa das amostras globais e da fracção argilosa ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ) dos finos das pedreiras (LNEC, a publicar). ....	81
Quadro 2.3 - Propriedades índice dos finos das pedreiras (adaptado de Frias <i>et al.</i> , 2008).....	81
Quadro 2.4 - Propriedades físicas dos finos das pedreiras (adaptado de Frias <i>et al.</i> , 2008).....	82

Quadro 2.5 -	Condutividade hidráulica dos finos das pedreiras, compactados pelos métodos Proctor normal (PN) e modificado (PM) (adaptado de Frias <i>et al.</i> , 2008). ....	83
Quadro 2.6 -	Características da bentonite sódica (adaptado de LNEC, 2007). ....	85
Quadro 2.7 -	Composição granulométrica das misturas de FML e CRV com bentonite. ....	87
Quadro 2.8 -	Limites de consistência das misturas de FML e CRV com bentonite. ....	88
Quadro 2.9 -	Classificação geotécnica das misturas de FML e de CRV com bentonite. ....	93
Quadro 2.10 -	Valores do azul de metileno das misturas de FML e CRV com bentonite. ....	97
Quadro 2.11 -	Expansibilidade livre das misturas de FML e CRV com bentonite. ....	99
Quadro 2.12 -	Peso volúmico seco máximo e teor em água óptimo das misturas de FML e CRV com bentonite, obtidos pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado. ....	101
Quadro 2.13 -	Programa dos ensaios de permeabilidade efectuados sobre as misturas de FML e CRV com bentonite. ....	110
Quadro 2.14 -	Duração aproximada de cada patamar de carga hidráulica nos ensaios de permeabilidade. ....	116
Quadro 2.15 -	Síntese dos resultados dos ensaios de permeabilidade efectuados nas misturas de FML com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM). ....	125

Quadro 2.16 -	Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de FML com bentonite, compactados pelo método Proctor normal (PN). .....	126
Quadro 2.17 -	Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de FML com bentonite, compactados pelo método Proctor modificado (PM). .....	126
Quadro 2.18 -	Síntese dos resultados dos ensaios de permeabilidade efectuados nas misturas de CRV com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM). .....	135
Quadro 2.19 -	Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de CRV com bentonite, compactados pelo método Proctor normal (PN). .....	136
Quadro 2.20 -	Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de CRV com bentonite, compactados pelo método Proctor modificado (PM). .....	136
Quadro 2.21 -	Provetes observados ao Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental. ....	142

# LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIACÕES

Embora o significado das notações e abreviações seja dado no texto, considerou-se útil apresentar uma lista com a maioria deles. Em certos casos, existem notações e símbolos com mais do que um significado.

Sempre que possível, adoptou-se a terminologia da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ISSMGE, 1981).

## NOTAÇÕES

---

det	- designação do detector
e	- índice de vazios
h	- carga hidráulica
$I_p$	- índice de plasticidade
k	- condutividade hidráulica
mag	- magnitude de amplificação
n	- porosidade
t	- tempo
temp	- temperatura
w	- teor em água



$w_{op}$	- teor em água óptimo
$w_{opn-2\%}$	- teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo pelo método Proctor normal
$w_{opm-2\%}$	- teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo pelo método Proctor modificado
$w_L$	- limite de liquidez
$w_P$	- limite de plasticidade
$w_S$	- limite de retracção
$\gamma_d$	- peso volúmico seco
$\gamma_{dmax}$	- peso volúmico seco máximo
$\gamma_s$	- peso volúmico das partículas sólidas
$\rho_s$	- massa volúmica das partículas
A	- área da secção transversal do provete / área do ánodo
AM	- amostra
B	- teor de bentonite
BET	- método para a determinação da superfície específica externa
C	- condensador
CE	- condutividade eléctrica
CS	- condicionamento do sinal
D	- bobines de deflexão
DR	- densidade relativa
E	- expansibilidade pelo método LNEC / feixe de electrões

E <sup>+</sup>	- catião de troca
Eh	- potencial redox
F	- filamento
HV	- tensão de aceleração do feixe de electrões
I <sub>g</sub>	- Expansibilidade pelo método Holtz e Gibbs
K	- permeabilidade intrínseca
L	- altura do provete
M	- monitor
ML	- siltes orgânicos (segundo a classificação USCS)
O	- objectiva
pH	- $-\log[\text{H}_3\text{O}^+]$
PN	- Proctor normal
PM	- Proctor modificado
S <sub>r</sub>	- grau de saturação
V	- volume de solução efluente / controlo de varrimento
V <sub>i</sub>	- volume inicial do solo seco
V <sub>f</sub>	- volume final do solo húmido
VBS	- “valeur de bleu de méthylène d’un sol”, valor do azul de metileno de um solo
W	- whenelt
WD	- distância de trabalho à lente objectiva

## NOTAÇÕES E ABREVIACÕES ESPECIAIS

Å	-angstrom
a	- ano
cm	-centímetro
cm <sup>3</sup>	-centímetro cúbico
cm/s	-centímetro por segundo
°C	-grau Célsius
<i>et al.</i>	-et alia
eV	-electrões volt
g	-grama
g/cm <sup>3</sup>	-grama por centímetro cúbico
kg	-quilograma
keV	-quilo electrão volt
kN/m <sup>3</sup>	-kilonewton por metro cúbico
kPa	-quilopascal
l	-litro
m	-metro
m <sup>2</sup>	-metro quadrado
m <sup>2</sup> /g	-metro quadrado por grama
M	-molaridade
meq/100g	-miliequivalente por 100 gramas

ml	- mililitros
mm	- milímetro
mS/cm	- milisiemens por centímetro
mol	- mole
mol/l	- moles por litro
mV	- milivolt
N.P.	- não plástico
nº	- número
ppm	- partes por milhão
Proc.	- procedimento
rad	- radiano
s	- segundo
S	- Siemens
t	- tonelada
V	- Volt
%	- percentagem
$\Delta$	- operador de diferenças
$\mu\text{m}$	- micrómetro
$\mu\text{S}$	- microsiemens
#	- malha do crivo
>	- maior que
<	- menor que

+ – mais

± – mais ou menos

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto

CRV – Cervães

DG – Departamento de Geotecnia

EUA – Estados Unidos da América

FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

FML – Famalicão

GM – geomembrana

IP – Instituto Público

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MEV – Microscópio electrónico de varrimento

MEV-A – Microscópio electrónico de varrimento ambiental

ME – Mota-Engil

NGEA – Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental

PE – polietileno

PEHD – polietileno de alta densidade

PVC – policloreto de vinila

USCS      - Unified Soil Classification System

## SÍMBOLOS QUÍMICOS

Elementos ordenados segundo a Tabela Periódica.

H              - hidrogénio

O              - oxigénio

Na             - sódio

Mg            - magnésio

Al             - alumínio

Si             - silício

K              - potássio

Ca             - cálcio

Fe             - ferro

OH            - hidróxido

CH<sub>3</sub>COOH   - ácido acético

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>       - ácido sulfúrico

CaCl<sub>2</sub>       - cloreto de cálcio

NaCl          - cloreto de sódio

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>      - sulfato de sódio



# AGRADECIMENTOS

O autor pretende expressar agradecimento às seguintes instituições:

- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em particular ao Departamento de Geotecnia (DG) e ao Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental (NGEA) que como instituição de acolhimento proporcionou os meios técnicos e financeiros.
- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), principalmente ao Departamento de Geologia, por terem aceite o tema da dissertação.

O autor expressa, a título individual, o agradecimento:

- ao Doutor António José Roque (LNEC), pela orientação técnica e científica da dissertação, pelo apoio e paciência demonstrada.
- à Doutora Isabel Moitinho de Almeida (FCUL), pela orientação técnica e científica da dissertação, por todo o apoio e incentivo, bem como pela disponibilidade evidenciada.
- aos colegas do Departamento de Geotecnia (LNEC), pela colaboração na realização dos ensaios laboratoriais, em particular aos técnicos Ana Cristina Louro, António Cardoso, Luís Pinto e Fátima Carrim.
- ao Doutor Carlos Moreira de Sá (CEMUP), pela colaboração na observação ao Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental e pela revisão da secção sobre microscopia.
- à Doutora Isabel Costa, pela revisão do *Abstract*.
- à companheira de trabalho e de gabinete, Alexandra Frias, pela disponibilização de dados laboratoriais, pelas conversas de esclarecimento e de apoio.



- aos meus pais, pelo seu apoio incondicional e pelo incentivo profissional.
- aos meus amigos, a todos eles, sem esquecer nenhum, pelo companheirismo, amizade e momentos de distração.
- à Rita, pela sua paciência, incentivo e apoio incondicional.

**Obrigado a todos.**

**“Se eu não morresse nunca! E  
eternamente buscasse e  
conseguisse a perfeição das  
coisas!”**

Cesário Verde



# INTRODUÇÃO GERAL

## JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

Em 2006 foi celebrado um Protocolo entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC) e o Grupo Mota-Engil (Grupo ME), onde também participa a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), com o principal objectivo de ser avaliada a viabilidade técnica da reciclagem de finos de pedreiras de granito, gerados durante o processo de produção de inertes (agregados e areias) nos Centros Industriais (pedreiras) do Grupo ME, em infraestruturas de transporte e em obras geotécnicas.

A procura de aplicações para a valorização destes materiais, e de outros afim, pretende-se que contribua, num futuro próximo, para a implementação de políticas de construção sustentável nas obras de engenharia civil, com importantes vantagens económicas e ambientais para o país.

O Grupo ME explora sete pedreiras em jazidas graníticas, no norte do país, com instalações para lavagem dos inertes produzidos e consequente geração de finos. A massa anual dos finos produzida em cada uma das pedreiras, que em conjunto totalizam 75.000 toneladas por ano (t/a), é, de acordo com os dados disponibilizados pela empresa, a seguinte:

- 1) Bouça do Menino (Cervães, Barcelos) - 12.020 t/a;
- 2) Moinho de Vento (Portela, Vila Nova de Famalicão) - 14.746 t/a;
- 3) Coutada N° 2 (Monte Córdova, Santo Tirso) - aproximadamente 12.000 t/a;
- 4) Pedreira da Várzea (Aboadela, Amarante) - 7.000 a 8.000 t/a;

- 5) Mimosa (Cabeça Santa, Penafiel) - 10.000 a 12.000 t/a;
- 6) Monte das Carrascas (Açores, Celorico da Beira) - 2.000 a 3.000 t/a;
- 7) Capsfil (Curva de Nogueira, Vila Flor) - aproximadamente 12.000 t/a.

Os trabalhos já desenvolvidos no âmbito do Protocolo, mostram que a permeabilidade dos finos das pedreiras estudadas (Pedreira da Bouça do Menino e Pedreira do Moinho de Vento) não é suficientemente baixa para viabilizar a sua aplicação na construção de barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais, que requeiram valores para a condutividade hidráulica inferiores ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s. São exemplo deste tipo de obras, as camadas dos sistemas de confinamento basal e de cobertura final presentes nos aterros de resíduos perigosos e não perigosos, conforme o disposto no Decreto-Lei n.º183/2009, de 10 de Agosto.

Com vista a contribuir para a reciclagem dos finos gerados nas pedreiras e, desta forma, a solucionar os custos ambientais resultantes do seu armazenamento nas unidades industriais ou encaminhamento para aterros de resíduos e a promover a sua valorização económica, na presente dissertação, também elaborada no âmbito do Protocolo, é:

- a) estudado o comportamento hidráulico dos finos da Pedreira da Bouça do Menino e da Pedreira do Moinho de Vento, tratados com pequenas percentagens (2%, 4% e 6%) de uma bentonite sódica natural;
- b) analisado o melhoramento da capacidade de confinamento hidráulico das misturas dos finos das pedreiras com a bentonite, comparativamente com a dos finos das pedreiras;

- c) avaliada a viabilidade da utilização das misturas finos-bentonite em estruturas de confinamento de resíduos, como é o caso dos aterros de resíduos e de áreas contaminadas, como é o caso das áreas mineiras degradadas.

## OBJECTIVOS

Com o objectivo de valorizar um resíduo, procede-se, na presente dissertação de mestrado, à avaliação da condutividade hidráulica de misturas de finos de pedreiras de granito, situadas no norte de Portugal, com uma bentonite sódica natural e à análise da viabilidade técnica da aplicação destas misturas na construção de estruturas de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais.

Analisa-se, igualmente, a influência da percentagem da bentonite no comportamento hidráulico das misturas finos-bentonite e compara-se a condutividade hidráulica destas misturas com a condutividade hidráulica dos finos das duas pedreiras, tendo por base os resultados obtidos para os finos em trabalhos já realizados no âmbito do Protocolo LNEC-Grupo ME.

Por fim, recorrendo a um Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental, observou-se a microestrutura das misturas finos-bentonite compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, antes e após a fase de percolação com água desmineralizada nos ensaios de permeabilidade e a microestrutura dos finos, após compactação pelos mesmos métodos.

Os principais objectivos das observações efectuadas foram:

- a) a comparação da microestrutura das misturas finos-bentonite com a microestrutura dos finos, após compactação;
- b) a avaliação da influência da energia de compactação no arranjo estrutural das misturas finos-bentonite e dos finos;
- c) a avaliação da influência da percolação da água desmineralizada, utilizada na realização dos ensaios de permeabilidade, no comportamento da bentonite presente nas misturas.

## ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em três Capítulos.

No primeiro Capítulo, de recolha bibliográfica e sua análise, apresentam-se: a) as principais propriedades dos minerais argilosos, com particular ênfase para as bentonites, b) a influência do teor em água de compactação na permeabilidade dos solos, c) estudos laboratoriais sobre a condutividade hidráulica de misturas de solos com bentonites, e d) o desempenho hidráulico de barreiras de confinamento construídas a partir de misturas de solos com bentonites.

O segundo Capítulo corresponde ao trabalho laboratorial desenvolvido. No estudo das misturas dos finos da Pedreira da Bouça do Menino e da Pedreira do Moinho de Vento com uma bentonite sódica natural, foram realizados ensaios para a determinação das: a) propriedades índice (composição granulométrica e limites de consistência); b) propriedades físicas (qualidade dos finos, expansibilidade, e relação entre peso volumico seco e teor em água de compactação), e c) propriedades hidráulicas (condutividade hidráulica). Na secção em que se apresenta o estudo da condutividade hidráulica, também se descreve o equipamento utilizado nos ensaios de permeabilidade e as condições de execução destes ensaios. Para além disso, expõem-se as propriedades físicas, iniciais (após compactação) e finais (após ensaio de permeabilidade), dos provetes das misturas compactados pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, e mostram-se as variações do pH e da condutividade eléctrica das soluções efluentes em função do tempo. Os resultados obtidos para as diferentes propriedades acima mencionadas são analisados e comparados com os já obtidos para os finos das pedreiras noutros trabalhos, realizados no âmbito do Protocolo, com o objectivo de se avaliarem as modificações introduzidas pela adição da bentonite. Por último, apresenta-se o estudo da microestrutura das misturas dos finos das pedreiras com a bentonite, observada ao Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental.

No terceiro Capítulo, começa-se por expôr as considerações finais, redigidas com base nos resultados obtidos e na comparação destes com os obtidos em estudos



anteriores, designadamente no âmbito do Protocolo, e, por último, apresentam-se as perspectivas futuras para o desenvolvimento de novas linhas de investigação no tema.

# CAPÍTULO 1.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo apresenta-se uma síntese bibliográfica sobre:

- 1) a estrutura dos minerais argilosos cristalinos;
- 2) algumas propriedades das bentonites e a compatibilidade destas com soluções aquosas de diferentes características;
- 3) a influência do teor em água de compactação na permeabilidade dos solos;
- 4) estudos laboratoriais que avaliaram a condutividade hidráulica de misturas de solos com bentonites;
- 5) o desempenho hidráulico de barreiras de confinamento construídas a partir de misturas de solo com bentonites.

### 1.2. MINERAIS ARGILOSOS

#### 1.2.1. Introdução

O termo “argila” é utilizado em diferentes contextos. Como classe textural, corresponde a partículas com dimensão inferior ou igual a 2  $\mu\text{m}$ . Do ponto de vista

mineralógico, corresponde a minerais do grupo dos filossilicatos, designados como argilas. Como rocha, corresponde a materiais compostos essencialmente por minerais argilosos. Como matéria-prima, trata-se de um produto natural que se torna consistente e rijo após secagem, adquirindo grande dureza quando submetido a elevadas temperaturas ( $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Gomes, 1986). Por outro lado, em resultado da sensibilidade à água dos minerais que a constituem, também pode adquirir comportamento plástico.

No entanto, o conceito que reúne aceitação mais geral, considera a argila como um material constituído por elementos de grão muito fino, de onde se destacam os minerais argilosos. Para além destes minerais argilosos, que de um modo geral são aluminossilicatos hidratados, uma argila também pode conter minerais não argilosos, matéria orgânica e outros componentes não minerais.

A argila encontra-se presente na superfície da crosta ou a pequena profundidade e tem origem geralmente nas interfaces da crosta com a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera. Resulta, essencialmente, da acção de processos químicos e, como tal, as suas características reflectem a natureza e o grau dos processos químicos que, ao longo do tempo, levaram à sua formação nos vários ambientes.

Entre as várias gamas de produtos naturais e minerais, a argila é um dos que apresenta um maior número de aplicações. Como exemplos, temos as indústrias da cerâmica, do papel, das tintas ou do cimento e as aplicações nas perfurações para pesquisa e exploração de água, petróleo e gás. Outra utilização, muito frequente no passado, foi o fabrico de adobe, havendo testemunhos de habitações e monumentos na região da Mesopotâmia, que datam de há mais de 10.000 anos.

Os minerais argilosos são os principais componentes dos solos argilosos, condicionando a maior parte das suas propriedades. São geralmente cristalinos, apresentando uma estrutura em camadas e folhas e, com menos frequência, em cadeias. Quimicamente, são aluminossilicatos hidratados que podem conter catiões, como o magnésio (Mg), o ferro (Fe), o cálcio (Ca), o potássio (K), entre outros. Estruturalmente, são considerados filossilicatos, sendo constituídos por uma

sequência de folhas tetraédricas de silício (Si) e de oxigénio (O) e de folhas octaédricas de alumínio (Al). Estes elementos, no estado iónico, podem organizar-se em sete modelos estruturais, tridimensionalmente distintos.

Os componentes básicos estruturais dos minerais argilosos, por ordem crescente de complexidade, são os seguintes: planos atómicos, folhas estruturais, camadas estruturais e unidade estrutural. Os planos atómicos compreendem os átomos, que na estrutura do mineral argiloso se dispõem complanarmente. As folhas estruturais são agrupamentos de átomos pertencentes a vários planos atómicos, que formam configurações poliédricas (tetraedros ou octaedros). As camadas estruturais são agrupamentos de folhas estruturais. Por último, a unidade estrutural é o motivo básico que, por repetição simétrica, origina toda a estrutura, que compreende as camadas estruturais básicas e os espaços intercamadas. O número e a natureza das folhas estruturais existentes nas camadas estruturais, que por sua vez fazem parte da unidade estrutural, determinam os três tipos estruturais básicos (1:1, 2:1 e 2:1:1) dos minerais argilosos.

### **1.2.2. Estrutura dos minerais argilosos cristalinos**

A divisão estrutural dos minerais argilosos faz-se segundo 7 modelos, que correspondem aos 7 grupos sistemáticos destes materiais cristalinos. Destes 7 grupos, 6 têm modelos estruturais organizados em folhas e camadas, justificando a designação de filossilicatos. O grupo da paligorskite e sepiolite apresenta uma estrutura em forma de fibra. Cada grupo engloba várias espécies, o que se deve em particular à substituição atómica isomórfica comum nos minerais argilosos. No entanto, este processo leva a defeitos estruturais de carácter pontual. As principais condicionantes à substituição iónica são a semelhança de raios iónicos, as cargas eléctricas e os números de coordenação. A Figura 1.1 apresenta esquematicamente um tetraedro de sílica, uma folha tetraédrica de sílica ( $\text{Si}_2\text{O}_5$ ), um octaedro, em que o

átomo coordenado pode ser de alumínio, de ferro ou de magnésio e uma folha octaédrica.

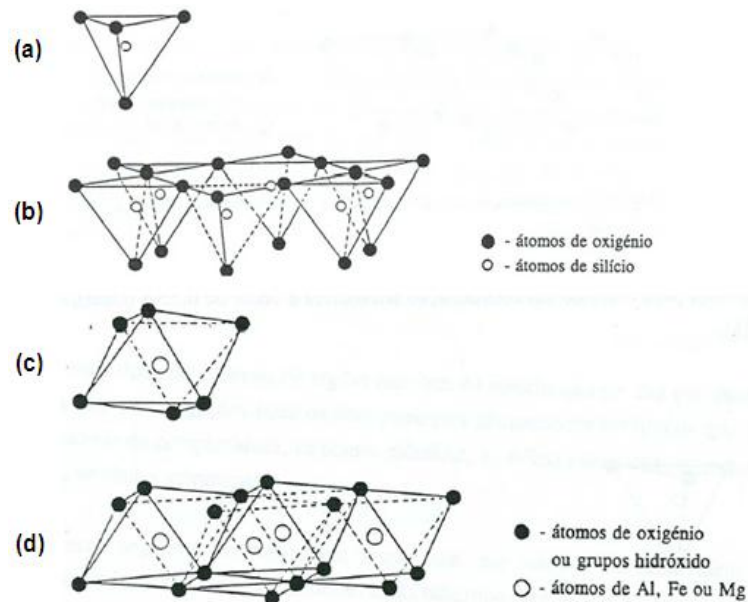


Figura 1.1 - Representação esquemática de: (a) um tetraedro; (b) uma folha tetraédrica; (c) um octaedro, em que o átomo coordenado pode ser Al - alumínio, Fe - ferro ou Mg - magnésio; (d) uma folha octaédrica (adaptado de Gomes, 1986).

As principais características dos 7 grupos sistemáticos dos minerais argilosos serão abordadas de seguida.

### 1.2.2.1. Grupo da caulinite

O grupo da caulinite engloba minerais dioctaédricos, como a Caulinite e a Halosite, e minerais trioctaédricos, como a Antigorite e o Crisólito.

A estrutura básica deste grupo é uma camada formada por uma folha octaédrica e por uma folha tetraédrica (Figura 1.2). O espaçamento entre as camadas é de  $7\text{\AA}$  ( $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m}$ ). A ligação entre as camadas estruturais é efectuada por pontes de

hidrogénio, entre átomos de O e grupos OH, de planos atômicos justapostos. A fórmula química da Caulinite é:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ .

A Halosite é outra espécie da família da Caulinite, com as camadas estruturais por vezes separadas por moléculas de água, às quais estão fracamente ligadas. Os seus cristais apresentam geralmente a forma tubular, contrariamente aos da caulinite, que são lamelares, o que provoca um aumento no espaçamento entre camadas, que neste caso é de  $10\text{\AA}$ . A sua fórmula química mais comum é a seguinte:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . O outro subgrupo, o da serpentina, caracteriza-se por apresentar todas as posições octaédricas preenchidas por Mg. Inclui minerais como a Antigorite e o Crisótilo.

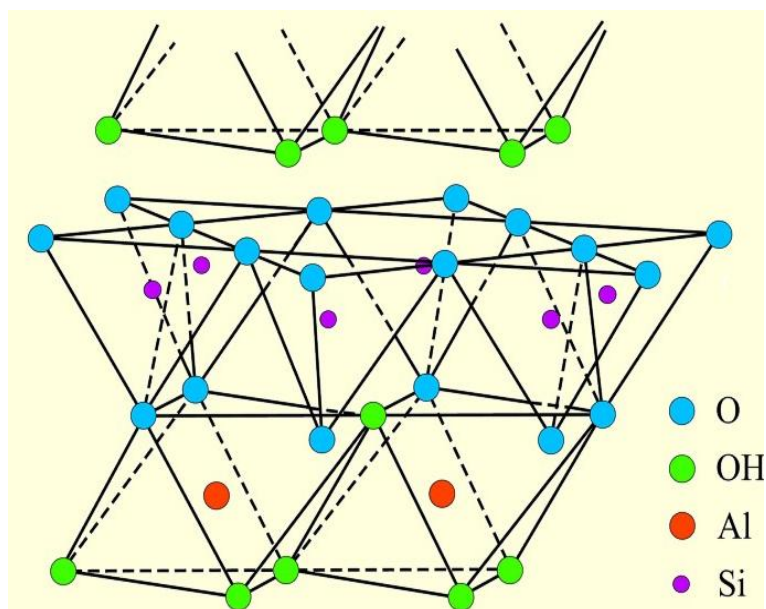


Figura 1.2 - Modelo esquemático da estrutura química da Caulinite: O – oxigénio; OH – hidróxido; Al – alumínio; Si – silício (Poppe *et al.*, 2001).

#### 1.2.2.2. Grupo da illite

Illite é essencialmente o nome dado ao grupo dos minerais dioctaédricos, não expansíveis, da dimensão das argilas, que apresentam estrutura semelhante à Moscovite.

A camada estrutural compreende uma folha com cátions de Al, Fe e Mg, em coordenação octaédrica entre duas folhas tetraédricas de sílica (2:1) (Figura 1.3). Na folha tetraédrica,  $\frac{1}{4}$  da sílica é substituída por Al. Entre as folhas tetraédricas de camadas adjacentes, encontram-se iões de K que compensam o desequilíbrio de cargas eléctricas resultantes das substituições isomórficas e que efectuem a ligação electrostática entre camadas. O espaçamento entre camadas é de 10Å. A estrutura da Ilite, deduzida a partir da estrutura da Pirofilite e da Moscovite, é a seguinte:

Pirofilite -  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Moscovite -  $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$

Ilite -  $\text{K}_x\text{Al}_2\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

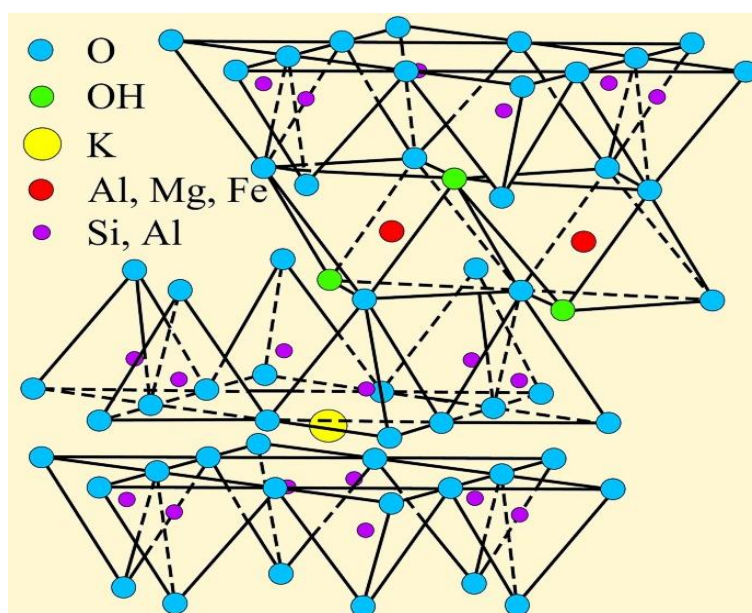


Figura 1.3 - Modelo esquemático da estrutura química da Ilite: O - oxigénio; OH - hidróxido; K - potássio; Al - alumínio; Mg - magnésio; Fe - ferro; Si - silício (Poppe *et al.*, 2001).

### 1.2.2.3. Grupo da esmectite

O grupo das esmectites inclui os minerais dioctaédricos Montmorilonite (Figura 1.4) e Beidelite e minerais trioctaédricos como a Saponite e a Sauconite, entre outros.

A sua estrutura é lamelar e constituída por duas folhas tetraédricas de sílica, com uma folha octaédrica intercalada, em que o ião coordenado é o Al ou o Mg (2:1). A ligação entre camadas é efectuada por forças de Van der Waals, que são ligações fracas. Estas ligações fracas permitem a entrada de água e de outras moléculas entre as camadas, fazendo com que estes minerais tenham um comportamento expansivo. O espaçamento entre camadas varia entre 10 a 17,5Å, dependendo do catião. Nos minerais deste grupo, destacam-se as substituições isomórficas e os catiões permutáveis na folha tetraédrica e na folha octaédrica. A composição química teórica da unidade estrutural da montmorilonite poderá ter a seguinte expressão:  $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4.n\text{H}_2\text{O}$ .

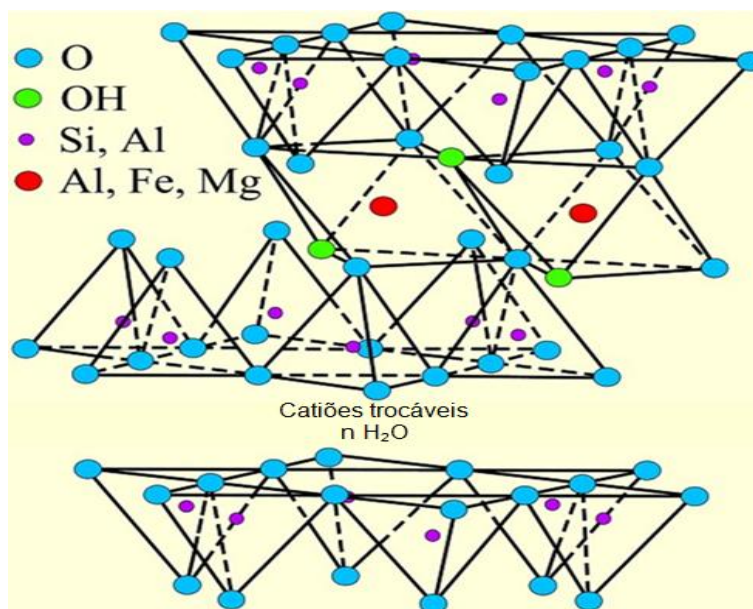


Figura 1.4 - Modelo esquemático da estrutura química da Montmorilonite: O - oxigénio; OH - hidróxido; Si - silício; Al - alumínio; Fe - ferro; Mg - magnésio (Poppe *et al.*, 2001).

#### 1.2.2.4. Grupo da clorite

A estrutura básica da Clorite (Figura 1.5) consiste em camadas de micas, na proporção 2:1, carregadas negativamente e alternadas, de forma regular, com camadas positivas de folhas octaédricas de Brucite.



As camadas estruturais estão separadas pelo espaçamento de  $14\text{\AA}$  e estão fortemente ligadas por íons hidratados de Mg, Fe ou Al. A fórmula química mais comum da Clorite é a seguinte:  $(\text{Mg,Fe,Al})_{12}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$ .

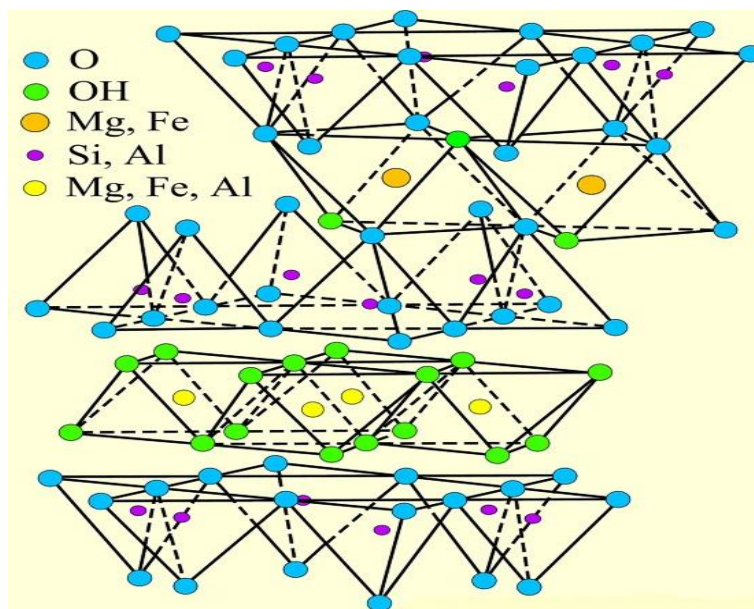


Figura 1.5 - Modelo esquemático da estrutura química da Clorite: O - oxigênio; OH - hidróxido; Mg - magnésio; Fe - ferro; Si - silício; Al - alumínio (Poppe *et al.*, 2001).

### 1.2.2.5. Grupo da vermiculite

O nome deste grupo provém da espécie tipo macroscópica, a Vermiculite, apresentar cristais com forma semelhante a pequenos vermes, quando aquecidas. Inclui minerais como as Micas. O grupo é constituído por uma camada central de íons (Mg, Fe), em coordenação octaédrica, intercalada entre duas folhas de tetraedros de sílica unidas (2:1). As camadas estruturais são típicas das micas trioctaédricas separadas por moléculas de água orientadas e hidratando determinados catiões permutáveis. O espaçamento entre camadas é de 10 a  $15\text{\AA}$ , espaçamento este, que se encontra dependente do grau de hidratação do catião de troca presente. A sua expansão, na presença de água ou outras moléculas polares, é inferior à da Montmorilonite. A composição química da unidade estrutural pode adoptar a seguinte fórmula:

$E^+(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al)_6(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$ , onde E indica o catião de troca, geralmente Mg. A estrutura química da Vermiculite encontra-se esquematizada na Figura 1.6.

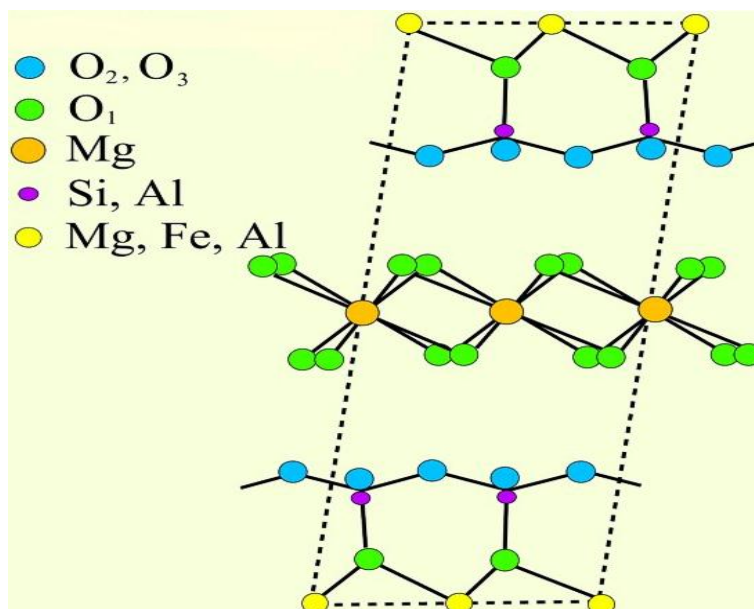


Figura 1.6 - Modelo esquemático da estrutura química da Vermiculite: O – oxigénio; Mg – magnésio Si – silício; Al – alumínio; Fe – ferro (Poppe *et al.*, 2001).

#### 1.2.2.6. Grupo dos interestratificados

Este grupo apresenta estruturas híbridas que compreendem modelos estruturais variados, intermédios ou mistos, dos 5 grupos descritos anteriormente. Representam estados instáveis ou de transição, que se verificam normalmente na evolução ou transformação de um mineral noutro. Dada a variedade de combinações possíveis a partir de duas unidades estruturais, as suas propriedades não se podem definir com precisão. Devido a esta variedade de combinações, podem ocorrer minerais argilosos que apresentem camadas estruturais do grupo da illite, intercaladas regular ou irregularmente por outras do grupo da montmorilonite. Quando o empilhamento é regular, a estrutura tem organização periódica das espécies minerais reais e a sua composição é de fácil determinação. No entanto, quando o empilhamento é aleatório

(irregular), a disposição das camadas não é periódica, e são designados pelo nome das espécies mineralógicas identificadas na sua estrutura, visto que a determinação das camadas estruturais é mais difícil. A Figura 1.7 representa a estrutura, regular e irregular, de minerais interestratificados construídos por duas camadas estruturais.



Figura 1.7 - Modelo simplificado de estruturas dos minerais interestratificados (Poppe *et al.*, 2001).

#### 1.2.2.7. Grupo da paligorsquite e sepiolite

A Paligorsquite (Figura 1.8) e a Sepiolite (Figura 1.9) apresentam morfologias fibrosas semelhantes, mas a Paligorsquite apresenta maior diversidade estrutural e, embora ambos sejam ricos em Mg, a Paligorsquite apresenta menos Mg e mais Al que a Sepiolite. Os catiões de Ca e Mg permutáveis encontram-se entre as fibras, enquanto as moléculas de água se dispõem nos bordos. Ambas as espécies podem conter  $\text{Al}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ou  $\text{Ca}^{2+}$ , contudo, de uma forma geral, a Paligorsquite contém menos catiões trivalentes.

A composição química correspondente à célula unitária da Paligorsquite e da Sepiolite é a seguinte:

Paligorsquite:  $\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{OH}_2)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ;

Sepiolite:  $\text{Mg}_8\text{Si}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_4 \cdot (\text{OH}_2)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .

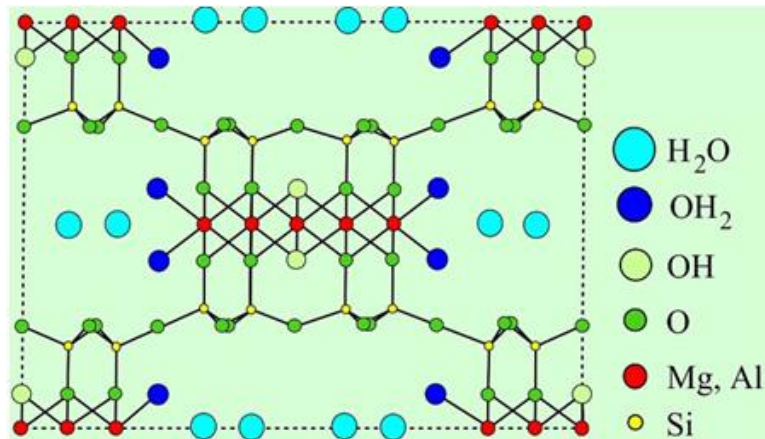


Figura 1.8 - Modelo esquemático da estrutura química da Paligorsquite:  $\text{H}_2\text{O}$  - água;  $\text{OH}_2$  - OH - hidróxido; O - oxigênio; Mg - magnésio; Al - alumínio; Si - silício (Poppe *et al.*, 2001).

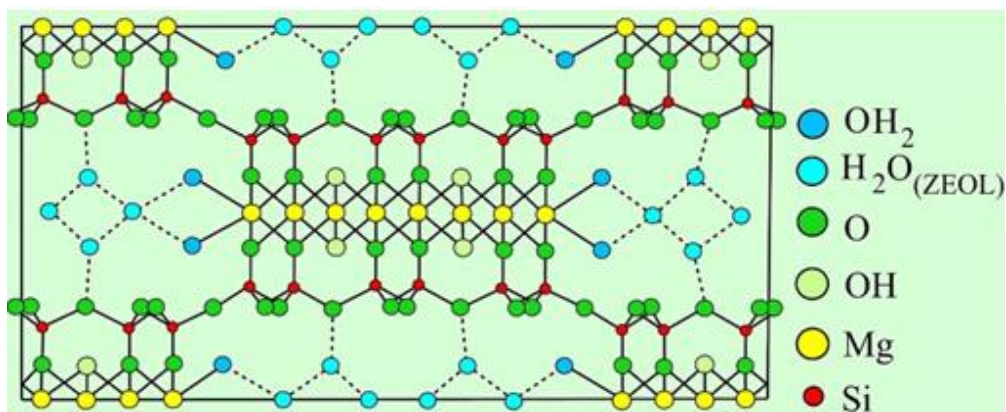


Figura 1.9 - Modelo esquemático da estrutura química da Sepiolite:  $\text{OH}_2$  -;  $\text{H}_2\text{O}$  - água; O - oxigênio; OH - hidróxido; Mg - magnésio; Si - silício (Poppe *et al.*, 2001).

## 1.3. BENTONITES

### 1.3.1. Introdução

A definição para o termo bentonite varia de autor para autor e varia também consoante as suas aplicações. Num sentido geral, pode dizer-se que bentonite designa as partículas muito finas da argila, com elevada capacidade para aumentarem de volume na presença de água.

A bentonite é essencialmente constituída por minerais do grupo das esmectites, primordialmente a Montmorilonite (60 a 80%), podendo conter outros minerais argilosos em maior ou menor proporção (nomeadamente Illite e Caulinite), além de Quartzo, Feldspatos, Pirite ou Calcite.

As bentonites têm origem na alteração deutérica ou meteórica, em meio submarino ou subaéreo, de rochas vulcânicas extrusivas, piroclásticas (cinzas e tufos) ou lávicas (riólitos, dacitos e andesitos). O termo bentonite surgiu pela primeira vez em Fort Benton no Estado do Wyoming, EUA, onde, devido às suas características especiais, era utilizada como lama bentonítica na estabilização dos furos de pesquisa e produção de petróleo.

Existem diferentes tipos de bentonite, dependendo do elemento principal, que pode ser Ca (cálcio), Na (sódio), K (potássio) ou Al (alumínio). No entanto, em termos industriais são divididas em sódicas e cálcicas. As bentonites sódicas caracterizam-se pelas suas propriedades coloidais, apresentando grande expansibilidade, quando em contacto com água, podendo absorver várias vezes o seu peso em água. Devido à sua grande expansibilidade, as bentonites sódicas são excelentes selantes, sendo alvo de grande utilização em obras geotécnicas, designadamente com funções ambientais. As bentonites cálcicas, sendo menos expansivas que as sódicas, apresentam, ainda assim, um importante grau de expansibilidade. Destacam-se por serem muito utilizadas como adsorventes.

Cavalcante Rocha (1995) refere que as propriedades de uma bentonite dependem de várias características mineralógicas, de onde podemos destacar:

- 1) a natureza e a variedade da Montmorilonite;
- 2) a pureza da bentonite (% de Montmorilonite);
- 3) o tamanho das partículas coloidais das partículas hidratadas (1-2 $\mu$ m);
- 4) a superfície específica;
- 5) a capacidade de troca catiónica;
- 6) a natureza dos catiões permutáveis (alcalinos ou alcalino-terrosos);
- 7) o comportamento quando aquecida (>1000°C);
- 8) a eventual presença de electrólitos (acção estabilizadora ou floculante).

### **1.3.2. Tipos e aplicações das bentonites**

Cavalcante Rocha (1995) refere que a natureza dos catiões permutáveis presentes nas bentonites naturais permite a sua classificação em duas categorias:

#### **1) Naturais:**

- Bentonites cálcicas naturais: os catiões permutáveis são essencialmente os catiões  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , em diversas proporções;
- Bentonites sódicas naturais: os catiões permutáveis são maioritariamente de  $\text{Na}^{2+}$  (70 - 80%), com 20 a 30% de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ;

#### **2) Artificiais:**

- Bentonites sódicas activadas: o catião permutável é na maioria de  $\text{Na}^{2+}$ . Estas bentonites são obtidas por técnicas artificiais de activação, geralmente através da adição de polímeros.

Industrialmente, as bentonites podem ser divididas em bentonites sódicas ou cálcicas, distinguindo-se pelo tipo de catião externo que é adsorvido pela superfície da partícula de argila durante a formação do mineral (Gleason *et al.*, 1997; Egloffstein, 2001). A bentonite sódica é mais utilizada do que a cálcica devido à sua maior expansibilidade e menor condutividade hidráulica.

Serra *et al.* (2008) referem que no âmbito geotécnico são inúmeras as aplicações das bentonites. Sob a forma de caldas de cimento-bentonite, eventualmente com adição de silicatos, de escórias de alto-forno ou de aditivos estabilizadores, fazem referência, na vertente mecânico-hidráulica, às principais aplicações seguintes: impermeabilização dos maciços rochosos por injeção; estabilização de valas para construção de paredes moldadas ou de pegões; estabilização de furos de sondagem ou para construção de estacas de betão; construção de paredes moldadas auto-endurecedoras de cimento-bentonite; selagem de câmaras piezométricas; colagem de tubos inclinométricos ao terreno; construção de cortinas de estacas secantes para contenção hidráulica e injeções de colagem no extradorso de aduelas.

No que diz respeito à vertente ambiental, as bentonites são muito utilizadas em barreiras de confinamento hidráulico (Gleason *et al.*, 1997; Serra *et al.*, 2008), e também em barreiras de confinamento hidráulico e químico, designadamente para aplicação em depósitos de material radioactivo (Komine e Ogata, 1999; Komine, 2004).

Algumas das principais propriedades das bentonites são apresentadas nas secções seguintes.

### **1.3.3. Propriedades das bentonites**

#### **1.3.3.1. Superfície específica**

A superfície específica de um solo corresponde ao somatório da área da superfície de cada partícula mineral por unidade de massa, e é expressa em  $\text{m}^2/\text{g}$ .

As partículas das argilas têm formas de placas porque os esqueletos minerais têm ligações fortes ao longo de dois eixos e ligações mais fracas entre as camadas. A espessura das partículas depende evidentemente da força de atracção entre essas camadas e a superfície específica depende dessa espessura. A Montmorilonite, quando em estado de grande dispersão, pode ter partículas constituídas por uma única camada, mas em geral tem várias camadas. A Montmorilonite, quando comparada com a Caulinite e a Illite, apresenta menor espessura, mas uma superfície específica total muito maior (Mineiro, 1981).

Um solo terá, por isso, uma superfície específica tanto maior quanto menor for a dimensão das partículas que o constituem. Para além disso, os minerais não-argilosos, tais como o Quartzo e os Feldspatos, apresentam uma superfície específica muito fraca comparativamente com a superfície específica dos minerais argilosos, em particular com os de expansibilidade elevada, como é o caso dos minerais do grupo das esmectites, onde há o importante contributo da superfície específica interna.

Como foi referido anteriormente, as bentonites são formadas essencialmente por minerais do grupo das esmectites, principalmente por minerais de Montmorilonite. Como é possível observar no Quadro 1.1, o valor da superfície específica é maior para a Montmorilonite do que para os outros minerais argilosos e, como consequência, maior também nas bentonites.



Quadro 1.1 - Valores para a superfície específica total de alguns materiais argilosos (adaptado de Roque, 2001).

Material		Superfície específica total (m <sup>2</sup> /g)
Caulinite		10 - 20
Illite		65 - 100
Montmorilonite		externa
		50 - 120
		interna
		700 - 840
Bentonite	Cálcica	300
	Sódica	800

### 1.3.3.2. Capacidade de troca catiónica

A capacidade de troca catiónica de um solo indica o desequilíbrio de cargas eléctricas na estrutura cristalina dos minerais de argila, particularmente devido às substituições isomórficas. A facilidade com que estas substituições podem ocorrer varia com a concentração dos iões permutáveis, a concentração dos iões adsorvidos pelo mineral, as dimensões dos iões e o nível de hidratação. A capacidade de troca catiónica de um solo, normalmente expressa em miliequivalentes por 100 g (meq/100 g) é uma medida do número máximo de catiões em condições específicas, especialmente para um determinado pH, que uma partícula de argila pode adsorver para neutralizar as cargas negativas (Roque, 2001).

O Quadro 1.2 apresenta valores para a capacidade de troca catiónica de alguns minerais argilosos.

Quadro 1.2 - Valores para a capacidade de troca catiónica de alguns minerais argilosos (adaptado de Roque, 2001).

Material	Capacidade de troca catiónica (meq/100g)
Caulinite	3 - 15
Illite	10 - 40
Montmorilonite	80 - 150

### 1.3.3.3. Dupla camada eléctrica

Os catiões permutáveis não se encontram agrupados numa camada sobre as superfícies das partículas argilosas, mas distribuem-se numa nuvem a uma certa distância das superfícies das partículas. As forças eléctricas entre as cargas negativas das superfícies e as cargas positivas dos iões atraem os catiões para as superfícies mas a energia térmica destes faz com que haja uma difusão para além da superfície embora com alta concentração iónica. O conjunto resultante das forças eléctricas atractivas e das de difusão térmica, denomina-se por dupla camada eléctrica (Mineiro, 1981).

No caso das bentonites, as cálcicas apenas conseguem aceitar duas a três camadas de água na sua rede cristalina. A absorção de água é rápida no início do processo, mas passa depois a uma taxa de crescimento praticamente nula. Por sua vez, as bentonites sódicas conseguem aceitar até quatro camadas de água, permitindo-lhes atingir valores de expansão muito mais elevados e apresentando um crescimento sem qualquer quebra. Relativamente à permeabilidade, as bentonites sódicas são, para o mesmo índice de vazios, muito menos permeáveis à água que as cálcicas atingindo por vezes essa relação valores da ordem de 1.000. Esta grande diferença de valores pode ser explicada recorrendo à teoria da dupla camada eléctrica, pois tendo o ião sódio uma valência de +1, enquanto a do cálcio é de +2, a espessura da dupla camada

é maior no caso do sódio, o que provoca uma expansão mais elevada e uma consequentemente menor permeabilidade (Lucas, 2000).

#### **1.3.3.4. Expansibilidade**

A expansibilidade é a propriedade que um solo tem de aumentar o seu volume, principalmente através da adsorção de moléculas de água. A expansibilidade pode ser de dois tipos: intra-partículas e inter-partículas.

A expansibilidade inter-partículas é a propriedade que resulta da possibilidade das moléculas de água serem adsorvidas no espaço intercamadas.

A expansibilidade intra-partículas resulta das moléculas de água adsorvidas na superfície exterior dos minerais argilosos, formando a dupla camada.

No caso das bentonites, para que tenham interesse industrial é necessário que a sua expansão, na presença da água, seja aproximadamente 12 a 15 vezes o seu volume inicial, o que corresponde a uma absorção de 5 a 6 vezes o seu próprio peso.

O Quadro 1.3 apresenta valores para a expansibilidade livre de alguns materiais argilosos. A expansibilidade livre é um procedimento, desenvolvido por Holtz e Gibbs (1956), de execução rápida e pouco dispendioso, utilizado na Geotecnia Ambiental para o estudo da compatibilidade solo-lixiviado.

Quadro 1.3 - Valores para a expansibilidade livre de alguns materiais argilosos (adaptado de Roque, 2001).

Material	Índice de expansibilidade livre (%)
Bentonite	34 <sup>(a)</sup>
Bentonite	1080 <sup>(a)</sup>
Esmeclite	377 <sup>(a)</sup>
Montmorilonite cálcica	2400 <sup>(b)</sup>
Montmorilonite cálcica	110 <sup>(c)</sup>
Montmorilonite sódica	320 <sup>(c)</sup>
Montmorilonite sódica activada	195 <sup>(c)</sup>

(a) Água desmineralizada

(b) Água (não havia referência à qualidade da água)

(c) Água da rede pública

### 1.3.3.5. Tixotropia

É a propriedade que a bentonite tem de, quando misturada com água e mediante agitação, se comportar como uma suspensão coloidal. No entanto, ao cessar a agitação, torna-se espessa e viscosa. Esta propriedade, dependente do tempo, denomina-se tixotropia e é muito importante em algumas das aplicações das argilas, como sejam, a realização de furos de sondagem ou a escavação de paredes moldadas, evitando o colapso das paredes, ou na preparação de tintas (Gomes, 1986).

De um modo geral, as argilas montmoriloníticas apresentam tixotropia mais elevada.

### 1.3.3.6. Plasticidade

Plasticidade é a propriedade que um corpo tem em alterar a sua forma, quando submetido a uma determinada tensão.

Um solo de granulometria fina, que contenha minerais de argila, pode ser remoldado sem se desagregar, na presença de água. Esta natureza coesiva é devido à água adsorvida que envolve as partículas de argila. Consoante o teor em água, o comportamento de um solo pode ser dividido em quatro estados básicos – sólido, semi-plástico, plástico e líquido, conforme mostra a Figura 1.10.

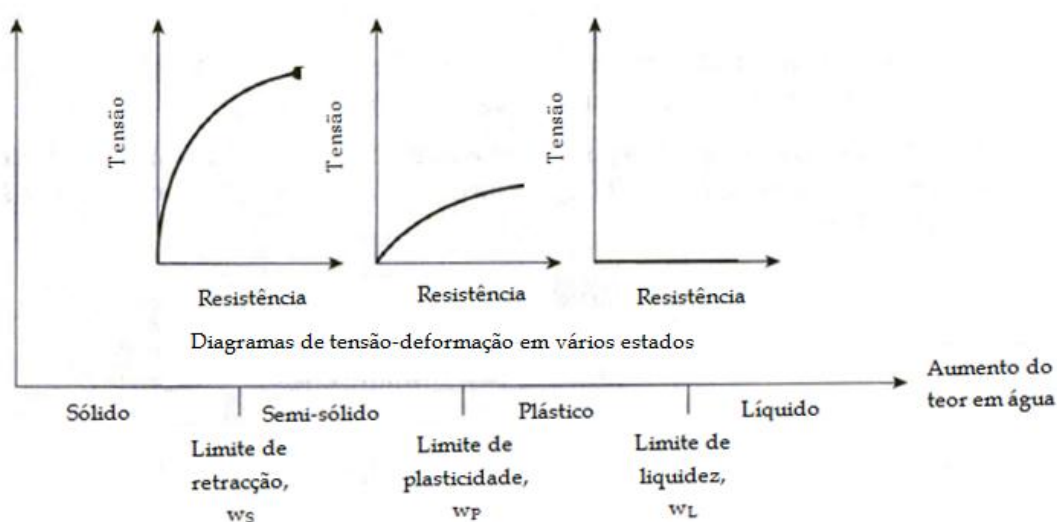


Figura 1.10 - Quatro estados do comportamento de um solo, em função do teor em água, e relação com a tensão-deformação (adaptado de Das, 2006).

Os factores físicos e químicos que afectam a plasticidade das argilas são: a mineralogia; a distribuição dimensional das partículas; a forma das partículas, principalmente a dos minerais argilosos; o estado de agregação das partículas, principalmente dos minerais argilosos; o valor da carga eléctrica dos minerais argilosos; a natureza dos catiões de troca da argila; e o grau de desfloculação-floculação (Velho *et al.*, 1998).

O Quadro 1.4 apresenta os limites de Atterberg ou de consistência, para alguns minerais argilosos, tendo em conta o ião permutável.

Quadro 1.4 - Limites de Atterberg para alguns minerais argilosos (adaptado de Lambe e Whitman, 1979).

Material	Ião de troca	Limite de liquidez $w_L$ (%)	Limite de plasticidade $w_P$ (%)	Índice de plasticidade $I_P$ (%)	Limite de retracção $w_S$ (%)
Montmorilonite	Na	710	54	656	9,9
	K	660	98	562	9,9
	Ca	510	81	429	10,5
	Mg	410	60	350	14,7
	Fe	290	75	215	10,3
	Fe <sup>(a)</sup>	140	73	67	-
Illite	Na	120	53	67	15,4
	K	120	60	60	17,5
	Ca	100	45	55	16,8
	Mg	95	46	49	14,7
	Fe	110	49	61	15,3
	Fe <sup>(a)</sup>	79	46	33	-
Caulinite	Na	53	32	21	26,8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24,5
	Mg	54	31	23	28,7
	Fe	59	37	22	29,2
	Fe <sup>(a)</sup>	56	35	21	-

(a) Após 5 ciclos de secagem-hidratação

#### 1.3.4. Compatibilidade da bentonite com soluções aquosas

De acordo com o modelo da dupla camada eléctrica dos minerais argilosos, descrito matematicamente pelo modelo de Gouy-Chapman, a sua estabilidade coloidal, principalmente a dos minerais de maior expansibilidade, é afectada pelas seguintes variáveis (Alther, 1987):

- 1) concentração do electrólito;
- 2) valência iónica;

- 3) constante dieléctrica;
- 4) temperatura;
- 5) tamanho do ião hidratado;
- 6) pH;
- 7) adsorção aniónica.

Alther (1987) fez uma breve discussão dos efeitos destes parâmetros no sistema argila-água, e de que modo estes podem afectar uma barreira de confinamento hidráulico construída a partir de uma mistura solo-bentonite.

Devido ao aumento das concentrações electrolíticas e da valência iónica, verifica-se uma diminuição da dupla camada eléctrica. Como consequência, a constante dieléctrica diminui. A constante dieléctrica da água pura é de 80,4, mas a da água que se encontra na superfície de uma partícula de argila é menor, da ordem de 1,3. No caso de uma barreira de confinamento hidráulico construída com uma mistura solo-bentonite, a adição de iões com maior valência e de moléculas com constantes dieléctricas inferiores à da água, provoca um aumento da permeabilidade da barreira.

A compatibilidade da bentonite, bem como de outros materiais, com certos resíduos são apresentados no Quadro 1.5.

O mesmo autor refere ainda, que existem dois mecanismos que contribuem para o aumento da permeabilidade de uma mistura de solo-bentonite quando em contacto com um líquido contaminado.

**1º Mecanismo:** os carbonatos e os sulfatos, existentes nos minerais de um solo, podem ser solúveis ao lixiviado, que poderá levar a uma perda de sólidos e a um aumento do volume de poros, e como tal, da permeabilidade;

**2º Mecanismo:** a substituição do fluido dos poros por um lixiviado contaminado, provoca a diminuição da espessura da dupla camada eléctrica de água que rodeia as partículas de argila, levando à diminuição da eficiência com que estas preenchem os vazios do solo. Esta situação provoca um aumento do espaço poroso na estrutura do solo disponível para a percolação, e como tal, um aumento da permeabilidade. Este mecanismo resulta de dois factores independentes:

- (1) a concentração de sais no lixiviado afecta a diferença do potencial eléctrico entre as partículas de argila e a água que circula livremente nos poros, que por sua vez, controla a resistência da dupla camada de água;
- (2) os iões de sódio existentes na superfície das partículas de argila são facilmente permutáveis com iões multivalentes, como o cálcio e outros, que se encontrem no lixiviado. Esta situação provoca uma dupla camada de menor espessura, devido à substituição do sódio pelo cálcio, levando assim, à diminuição da dimensão da dupla camada e como consequência, ao aumento da permeabilidade.

Quadro 1.5 - Compatibilidade do material constituinte da barreira com resíduos industriais (adaptado de Alther, 1987).

Material da barreira	Lamas cáusticas de petróleo	Ácido de decapagem	Lamas de galvanoplastia	Pesticidas tóxicos	Lamas oleosas de refinaria	Resíduos tóxicos farmacêuticos	Borracha e plástico
Betão betuminoso	R	R	R	R	F	R	B
Solo e cimento	R	F	F	B	B	B	B
Solo e asfalto	R	F	F	R	F	R	B
Membranas de asfalto	R	R	R	R	F	R	B
Solo e bentonite	F	F	F	B	B	B	B
Argilas compactadas	F	F	F	B	B	B	B

R - razoável; F - fraca; B - boa.



A presença de contaminantes orgânicos, como hidrocarbonetos e solventes e de contaminantes inorgânicos, como sais, ácidos e bases, reduzem a capacidade expansiva das bentonites, podendo mesmo anulá-la, dependendo da sua concentração na solução. É, por isso, muito importante pré-hidratar a bentonite, antes do seu contacto com soluções contaminantes, de modo a aumentar a sua capacidade de resistência a estes fluidos (Alther, 1987).

Para além desta solução técnica, também se recorre por vezes ao aumento da quantidade de bentonite utilizada na mistura. Esta prática tem porém a grande desvantagem de aumentar os custos da preparação da mistura. Sällfors e Öberg-Högsta (2002), conforme se verá na secção seguinte, referem que a percentagem de bentonite adicionada nas misturas é habitualmente inferior a 14%, quer por razões económicas (custo da bentonite), quer por razões de engenharia (percentagens elevadas de bentonite tornam as misturas mais plásticas e mais difíceis de compactar).

Alther (1987) apresentou um estudo sobre o comportamento hidráulico de misturas de solos com várias percentagens de bentonite, sem e com tratamento (à base da adição de polímeros de sódio, do tipo poliacrilato e acrilonitrilo), com diferentes soluções químicas, entre as quais, um lixiviado típico de um aterro de resíduos sólidos urbanos. Tanto as bentonites sem como as com tratamento foram pré-hidratadas. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 1.6.

Verificou, que as bentonites tratadas apresentaram maior resistência que as não tratadas, devido ao melhoramento da dispersão das partículas. Referiu ainda que algumas das misturas mostraram diminuição da permeabilidade quando sujeitas ao lixiviado do aterro de resíduos. Concluiu que o comportamento observado era devido:

- 1) aos sólidos em suspensão, que colmataram os poros do solo ao longo da superfície;
- 2) ao crescimento microbiano nos poros;

3) à possível precipitação de sais nos poros.

Concluiu ainda que as barreiras de confinamento de misturas de solo-bentonite, quando devidamente instaladas e pré-hidratadas, são capazes de conter uma ampla variedade de resíduos.

Quadro 1.6 - Resultados dos ensaios de permeabilidade com bentonite e várias soluções percolantes (adaptado de Alther, 1987).

Material	Solução influente/Condutividade hidráulica	
(5% bentonite, 95% areia)	Água destilada	Lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos
Bentonite sem tratamento	$5,9 \times 10^{-10}$ m/s	$6,9 \times 10^{-10}$ m/s
Bentonite com tratamento	$1,4 \times 10^{-10}$ m/s	$3 \times 10^{-10}$ m/s
(8% bentonite, 92% areia)	Água destilada	Solução salina (3,2% NaCl, 3,6% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
Bentonite sem tratamento	$4,5 \times 10^{-11}$ m/s	$6,8 \times 10^{-8}$ m/s
Bentonite com tratamento	$9,1 \times 10^{-11}$ m/s	$1,4 \times 10^{-8}$ m/s
(8% bentonite, 92% areia)	Água destilada	Solução salina (2% CaCl <sub>2</sub> )
Bentonite sem tratamento	$3 \times 10^{-11}$ m/s	$2 \times 10^{-8}$ m/s
Bentonite com tratamento	$3 \times 10^{-11}$ m/s	$2 \times 10^{-8}$ m/s
(8% bentonite, 92% areia)	Água destilada	Solução com pH=2 de ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
Bentonite sem tratamento	$2 \times 10^{-11}$ m/s	$2 \times 10^{-8}$ m/s
Bentonite com tratamento	$8 \times 10^{-11}$ m/s	$1 \times 10^{-8}$ m/s
(8% bentonite, 92% areia)	Água destilada	50% de solução de ácido acético (CH <sub>3</sub> COOH)
Bentonite sem tratamento	$1,1 \times 10^{-10}$ m/s	$1,0 \times 10^{-8}$ m/s

Ensaio de permeabilidade efectuados a carga constante, com uma pressão de 69 kPa. Utilização de normas ASTM, com um teor em água óptimo a 95% do Proctor normal.

## 1.4. TEOR EM ÁGUA DE COMPACTAÇÃO. SUA INFLUÊNCIA NA PERMEABILIDADE DOS SOLOS

A compactação é o processo mecânico pelo qual uma massa de solo constituída por partículas sólidas, água e ar vê reduzido o seu índice de vazios por redução do volume da sua fase gasosa conseguida à custa da aplicação repetida de cargas (Fernandes, 1994).

Como se sabe, a compactação de um solo argiloso com teor em água inferior ao teor em água ótimo (ramo seco da curva de compactação) ou com teor em água superior ao teor em água ótimo (ramo húmido da curva de compactação), pode influenciar significativamente a sua permeabilidade, ou no caso desta dissertação, a permeabilidade de uma mistura solo-bentonite.

Para os solos argilosos naturais utilizados na construção das barreiras de confinamento hidráulico, o teor em água de compactação é a variável mais importante, dado que controla as suas propriedades hidráulicas (Daniel e Koerner, 1995). A Figura 1.11 apresenta a relação típica entre a condutividade hidráulica e o teor em água de compactação obtida nos solos argilosos aplicados na construção das barreiras de confinamento hidráulico.

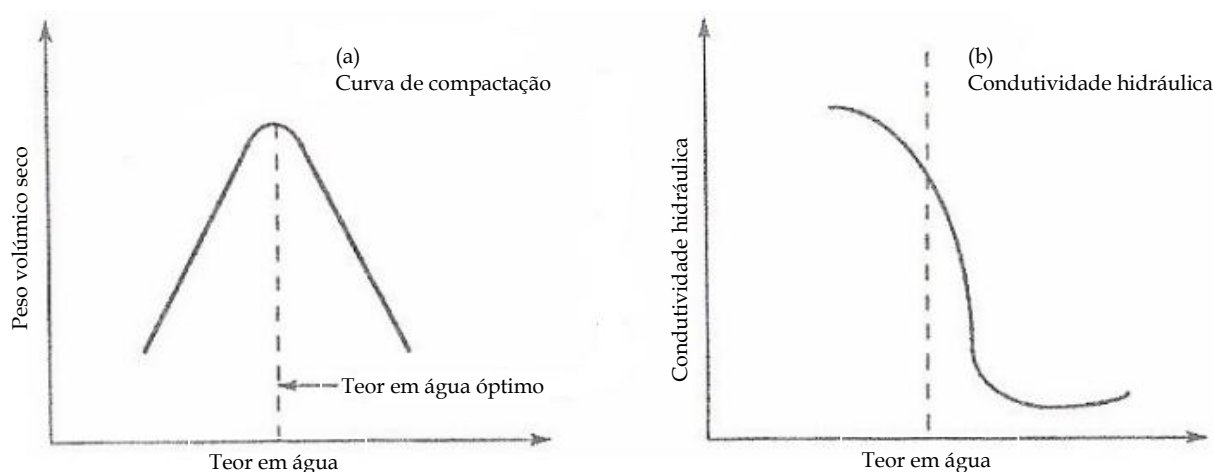


Figura 1.11 - Efeito do teor em água de compactação: (a) no peso volúmico seco; e (b) na condutividade hidráulica (adaptado de Daniel e Koerner, 1995).

Os solos argilosos compactados com teores em água inferiores ao teor em água ótimo tendem a apresentar condutividade hidráulica mais elevada do que os solos compactados com teores em água superiores ao teor em água ótimo, pelo que, geralmente, na construção das barreiras de confinamento hidráulico, a compactação dos solos se efectua preferencialmente com teores em água acima do teor em água ótimo (Daniel e Koerner, 1995). A Figura 1.12 apresenta a relação entre a condutividade hidráulica e o teor em água de um solo compactado estática e dinamicamente.

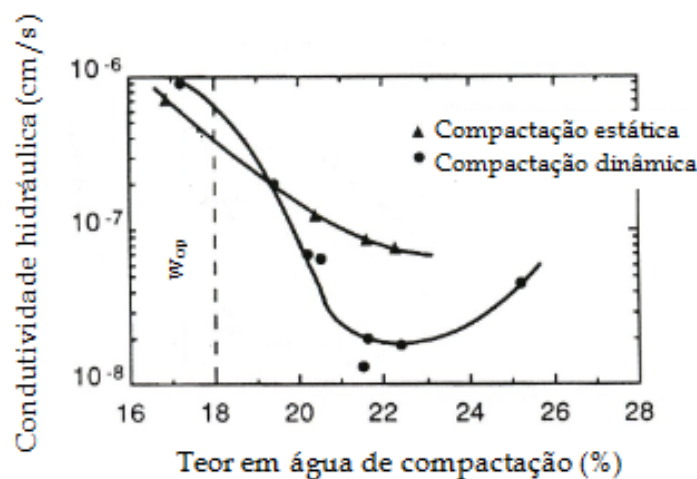


Figura 1.12 - Relação entre a condutividade hidráulica e o teor em água de um solo compactado estática e dinamicamente (Daniel e Koerner, 1995).

Moussai (1993), que também se refere a estudos sobre a influência do teor em água de compactação na permeabilidade dos solos argilosos, identifica duas teorias para explicar o fenómeno:

- 1) A teoria da orientação das partículas de argila (Lambe, 1958; *in* Moussai, 1993), que considera que a variação da permeabilidade em função do teor em água de compactação está directamente ligada à estrutura do solo. No ramo seco da curva de compactação, o solo apresenta uma estrutura floculada, enquanto no ramo húmido da curva apresenta uma estrutura dispersa (Figura 1.13).

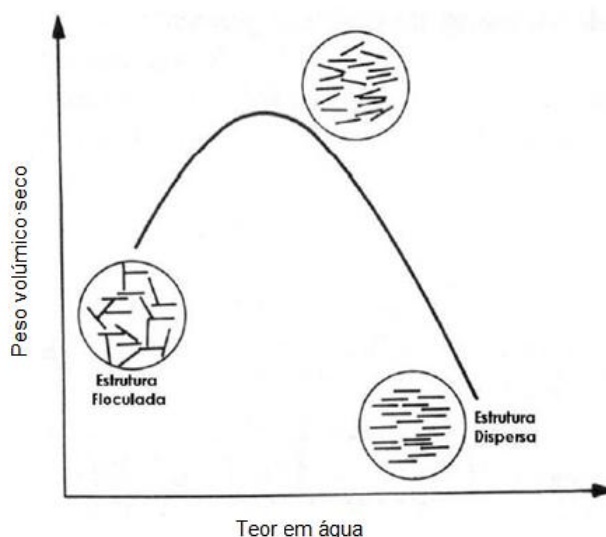


Figura 1.13 - Influência do teor em água de compactação na estrutura dos solos argilosos compactados (Lambe, 1958; adaptado de Lukiantchuki, 2007).

- 2) A teoria dos aglomerados de partículas, habitualmente designados por torrões, (Olsen, 1962; *in* Moussai, 1993), que considera que a circulação de água nos solos argilosos compactados se faz principalmente através dos vazios inter-torrões e dos torrões formados pelas partículas (Figura 1.14). Os torrões relativamente secos são rijos e, por isso, de compactação difícil para as energias normalmente utilizadas em geotecnia, formando vazios aparentes entre si que favorecem a percolação e que contribuem para a obtenção de valores de condutividade hidráulica elevada. Os torrões húmidos, pelo contrário, são facilmente deformáveis durante a operação de compactação, permitindo assim minimizar os vazios entre si e a obtenção de valores de condutividade hidráulica mais fracos.

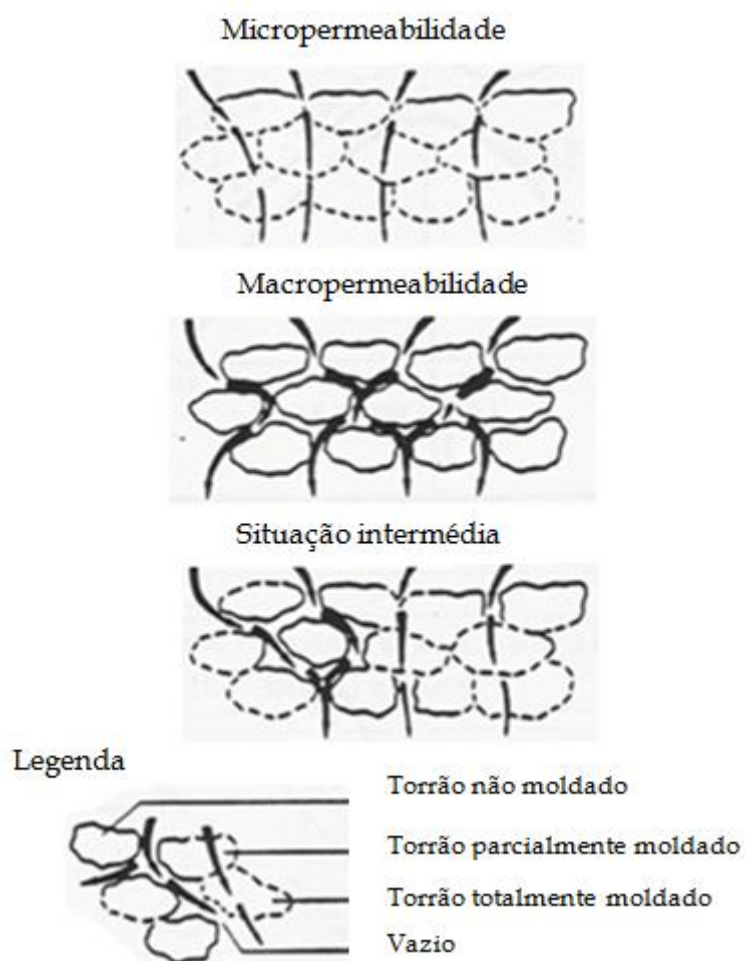


Figura 1.14 - Influência dos torrões na permeabilidade dos solos (após Herrmann e Elsbury, 1987; *in* Moussai, 1993).

## 1.5. ESTUDOS LABORATORIAIS. CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS SOLO-BENTONITE E DO SEU COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

As barreiras hidráulicas utilizadas no confinamento de resíduos são, geralmente, formadas por uma camada de solo argiloso compactado e uma geomembrana. Para que um material argiloso possa ser aplicado como barreira de confinamento hidráulico em aterros de resíduos não perigosos e perigosos, é necessário que a sua condutividade hidráulica seja inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s (Montañez, 2002).

No entanto, quando não existem manchas de empréstimo locais com solos de natureza argilosa, pode-se recorrer, com sucesso, a misturas de areia-bentonite para construir as barreiras de confinamento hidráulico de baixa permeabilidade. Magistris *et al.* (1998) referem, com base na bibliografia consultada, que a adição de bentonite a solos granulares pode formar uma mistura de baixa permeabilidade, mecanicamente estável, apesar das diferenças existentes entre as propriedades dos constituintes da mistura em termos de dimensão dos grãos e da actividade química. A adição de pequenas percentagens de bentonite (5-15%), podem melhorar o comportamento de um material granular, tanto a nível hidráulico como a nível mecânico.

A pesquisa de materiais de baixa permeabilidade em geotecnia, iniciou-se há várias décadas, sendo conhecidos, entre outros, os estudos clássicos de Lambe (1954 e 1958), Olsen (1962) e Mitchell *et al.* (1965).

Mais recentemente, há cerca de duas décadas, começaram a ser realizados estudos tendo em vista a utilização de solos na construção de barreiras hidráulicas para confinamento de resíduos depositados em aterro ou de áreas contaminadas. De entre esses estudos citam-se, por exemplo, os realizados com solos finos por D'Appolonia (1980), Daniel (1984), Benson e Daniel (1990), Shackelford (1994), Roque (2001) e Sällfors e Öberg-Högsta (2002), bem como os efectuados com misturas solo-bentonite (Chapuis 1990, 2002; Kenney *et al.*, 1992; Yanful e Shikatani, 1995; Aubertin *et al.*, 1996; Magistris *et al.*, 1998; Studds *et al.*, 1998; Abichou *et al.*, 2002; Sällfors e Öberg-

Högsta, 2002; Chalermyanont e Arrykul, 2005; Lukiantchuki, 2007; Gueddouda *et al.*, 2008; Lukiantchuki e Esquivel, 2008; Boscov *et al.*, 2009; Eid *et al.*, 2009).

Com base nos conhecimentos adquiridos nos estudos do desempenho hidráulico dos solos naturais e das misturas solos-bentonite, por um lado, e dada a necessidade, mais recentemente, de os países implementarem políticas de gestão de resíduos que privilegiem a sua valorização em detrimento da eliminação em aterro, por outro, vêm-se realizando estudos com resíduos, designadamente de misturas de resíduos com bentonite (Heineck *et al.*, 2003), tendo em vista a sua valorização na engenharia civil, em geral, e na geotecnia, em particular, designadamente na construção de barreiras de confinamento hidráulico.

Komine e Ogata (1999) estudaram misturas de areia com bentonite, em percentagens que variaram entre 5% e 50%, com o objectivo de avaliar a viabilidade da sua aplicação na construção de barreiras de confinamento em aterros de resíduos nucleares. Executaram ensaios de laboratório, em células triaxiais, com o intuito de observarem o comportamento expansivo das misturas areia-bentonite, sobre diferentes condições de pressão e deformação. Pretenderam ainda, observar o processo de expansibilidade da bentonite nas misturas recorrendo a um Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV).

Os autores chegaram às seguintes conclusões:

- a) as propriedades expansivas das misturas dependem da massa volúmica seca e da percentagem de bentonite em cada mistura;
- b) observaram, através da observação ao MEV, que a bentonite ao entrar em contacto com a água, aumenta o seu volume preenchendo os poros das misturas;

Os autores referem que o parâmetro “extensão volumétrica por expansão da montmorilonite” é um método simples para a avaliação da expansibilidade da mistura areia-bentonite, sendo que esta avaliação permitiu a obtenção de valores



máximos de expansibilidade, sobre várias pressões e tensões, das misturas areia-bentonite com várias massa volúmica seca e percentagem em bentonite.

Buettner (1985) referiu a construção de barreiras de confinamento com misturas solo-bentonite, na base e nos taludes de lagoas. Segundo o autor, a percentagem de bentonite necessária para assegurar um determinado valor de permeabilidade, pode ser estimada com base em estudos efectuados anteriormente ou então, determinada a partir de resultados obtidos em ensaios laboratoriais. A permeabilidade da mistura depende de vários factores, tendo sido mencionados: a granulometria do solo natural, o método de compactação e o grau de compactação. O processo de mistura também é um factor determinante, sendo o desempenho da barreira solo-bentonite tanto mais eficiente quanto maior for a uniformidade da distribuição da bentonite no solo.

A Figura 1.15 mostra, segundo Buettner (1985), os factores e os processos que podem influenciar a condutividade hidráulica de uma barreira de confinamento construída a partir de uma mistura solo-bentonite.

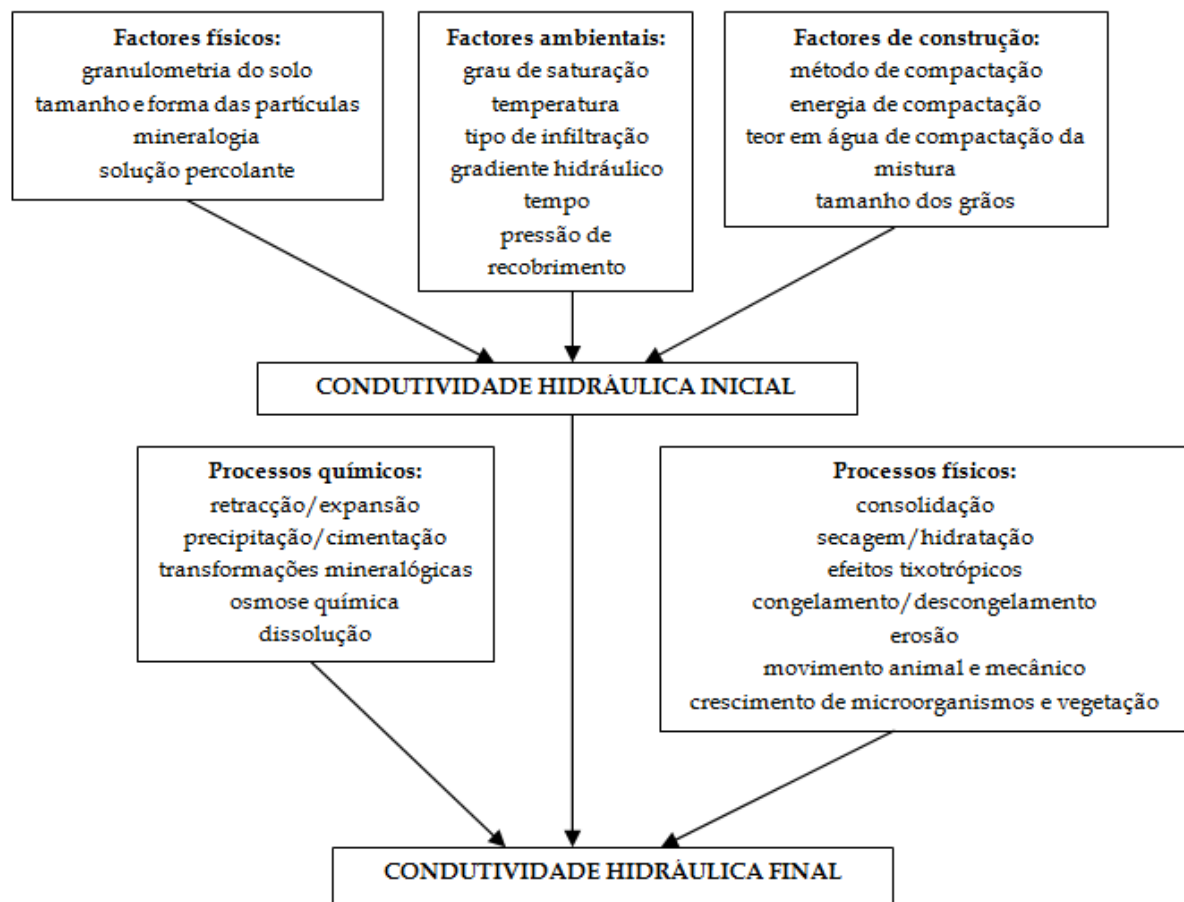


Figura 1.15 - Factores e processos que podem influenciar a condutividade hidráulica de uma barreira de confinamento construída a partir de uma mistura solo-bentonite (adaptado de Buettner, 1985).

O mesmo autor refere que o grau de compactação e o teor em água de compactação da mistura são factores que se encontram relacionados e que devem ser tidos em consideração. Se a compactação do material da barreira não for efectuada com o teor em água adequado, a permeabilidade da barreira poderá ser superior ao esperado.

Buettner (1985) refere ainda que não se deve utilizar bentonite granular na construção de barreiras de solo-bentonite. A melhor opção é a utilização de bentonite em pó. A bentonite na forma granular poderá não ser desagregada durante o processo de mistura, produzindo agregados de bentonite envolvidos por uma matriz das partículas do solo. Nesta situação a diminuição da condutividade hidráulica poderá ser muito pequena.

Segundo Kenney *et al.* (1992, *in* Abichou *et al.*, 2002) a condutividade hidráulica de uma mistura ideal é controlada pela condutividade hidráulica da bentonite.

No entanto, de acordo com Daniel (1993, *in* Lukiantchuki, 2007), a partir de uma determinada percentagem de bentonite, a condutividade hidráulica da mistura solo-bentonite mantém-se praticamente constante (Figura 1.16).

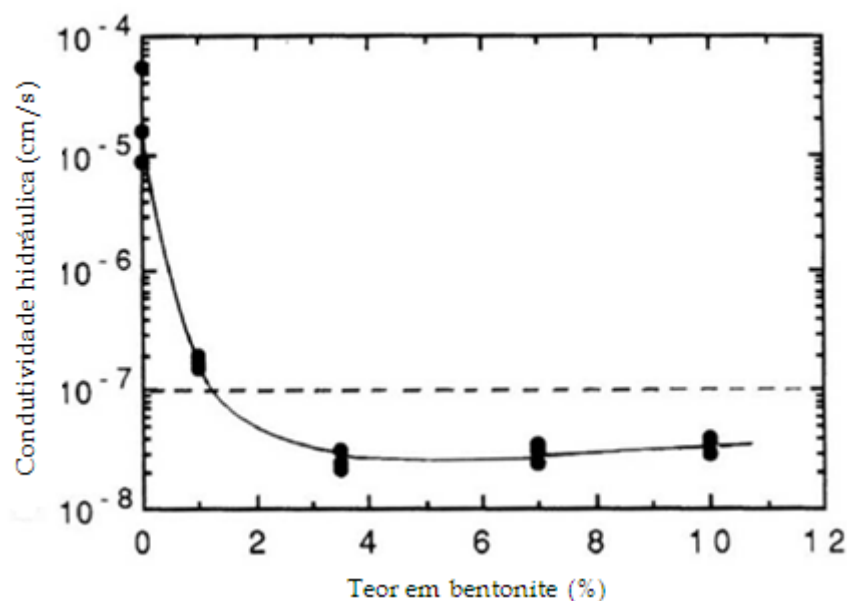


Figura 1.16 - Condutividade hidráulica de uma mistura solo-bentonite versus teor em bentonite (Daniel, 1993; adaptado de Lukiantchuki, 2007).

Abichou *et al.* (2002) estudaram a relação entre a microestrutura e a condutividade hidráulica de misturas experimentais de areia-bentonite, substituindo a areia por esferas de vidro. A bentonite era cálcica, em percentagens inferiores a 10%, sob a forma de pó e granular. A microestrutura das misturas foi observada ao Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) e os ensaios de permeabilidade foram realizados em permeâmetros de parede rígida, a carga variável, sobre misturas compactadas com o teor em água óptimo do método Proctor normal. Como solução percolante utilizaram água da rede de abastecimento público. Após o período de percolação, observaram ao MEV as misturas compactadas. Como o MEV utilizado implicava que

as amostras estivessem secas, recorreram a um método de congelamento-secagem para impedirem alterações à estrutura das misturas obtidas no final dos ensaios de permeabilidade. Observaram que as partículas de bentonite envolviam as esferas de vidro da dimensão da areia, diminuindo a área disponível para a percolação da água à medida que a percentagem de bentonite aumentava. Com teores em bentonite superiores a 5%, a condutividade hidráulica da mistura era controlada pela bentonite.

Ameta e Wayal (2008) estudaram o comportamento hidráulico de uma mistura de areia de duna, com diferentes percentagens de bentonite sódica (2, 4, 6, 8 e 10%). Fizeram a avaliação da permeabilidade recorrendo a ensaios edométricos e a ensaios de permeabilidade a carga variável, em permeâmetros de paredes rígidas. As amostras utilizadas nos ensaios edométricos foram colocadas num anel metálico e submetidas a pressões de 49, 98, 196, 392 e 785 kPa. Cada pressão foi mantida durante 24 horas. As amostras utilizadas nos ensaios a carga variável foram compactadas em moldes rígidos, com um teor em água óptimo. Antes da ligação dos provetes à coluna de água, as amostras foram saturadas durante um período mínimo de 24 horas e um período máximo de uma semana. Obtiveram como resultados para os ensaios edométricos e para os ensaios a carga variável, os valores apresentados no Quadro 1.7 e no Quadro 1.8, respectivamente.

Quadro 1.7 - Condutividade hidráulica das misturas obtida nos ensaios edométricos (adaptado de Ameta e Wayal, 2008).

Pressão (kPa)	Condutividade hidráulica (m/s) da mistura				
	98%areia 2%bentonite	96%areia 4%bentonite	94%areia 6%bentonite	92%areia 8%bentonite	90%areia 10%bentonite
49	$1,02 \times 10^{-7}$	$8,69 \times 10^{-8}$	$2,62 \times 10^{-8}$	$2,91 \times 10^{-9}$	$6,26 \times 10^{-10}$
98	$5,67 \times 10^{-8}$	$5,13 \times 10^{-8}$	$2,04 \times 10^{-8}$	$1,20 \times 10^{-9}$	$5,16 \times 10^{-10}$
196	$3,29 \times 10^{-8}$	$2,32 \times 10^{-8}$	$1,28 \times 10^{-8}$	$1,05 \times 10^{-9}$	$3,58 \times 10^{-10}$
392	$2,23 \times 10^{-8}$	$1,55 \times 10^{-8}$	$8,50 \times 10^{-9}$	$8,33 \times 10^{-10}$	$2,27 \times 10^{-10}$
785	$1,14 \times 10^{-8}$	$8,74 \times 10^{-8}$	$6,25 \times 10^{-9}$	$6,77 \times 10^{-10}$	$1,61 \times 10^{-10}$

Quadro 1.8 - Condutividade hidráulica das misturas obtida nos ensaios de permeabilidade a carga variável  
(adaptado de Ameta e Wayal, 2008).

Mistura	Condutividade hidráulica (m/s)
98%areia 2%bentonite	$1,65 \times 10^{-7}$
96%areia 4%bentonite	$4,23 \times 10^{-8}$
94%areia 6%bentonite	$7,82 \times 10^{-9}$
92%areia 8%bentonite	$2,18 \times 10^{-9}$
90%areia 10%bentonite	$6,94 \times 10^{-10}$

Boscov *et al.* (2009) realizaram ensaios de permeabilidade a carga constante, em permeâmetros de parede flexível, com um solo natural e uma mistura desse solo com bentonite. Compactaram as amostras com teores em água equivalentes aos teores ótimos dos métodos Proctor normal e Proctor modificado. Tal como outros autores, observaram que o teor em água ótimo aumentava e o peso volúmico seco máximo diminuía, à medida que a percentagem em bentonite aumentava. No entanto, o efeito da adição da bentonite no teor em água ótimo foi mais relevante na compactação pesada (Proctor modificado) do que na compactação leve (Proctor normal). Os resultados que obtiveram nos ensaios de permeabilidade encontram-se representados no Quadro 1.9.

Quadro 1.9 - Condutividade hidráulica de solos e misturas de solo-bentonite (adaptado de Boscov *et al.*, 2009).

Proctor	B (%)	$\Delta w$ (%)	DR (%)	k (m/s)
normal	0,0	3,3	97	$3,5 \times 10^{-8}$
normal	0,0	0,1	96	$5,6 \times 10^{-8}$
normal	0,0	-1,1	96	$1,0 \times 10^{-7}$
normal	5,0	1,3	96	$1,0 \times 10^{-8}$
modificado	0,0	0,0	99	$5,2 \times 10^{-8}$
modificado	0,0	1,5	98	$2,2 \times 10^{-8}$
modificado	0,0	4,2	95	$3,5 \times 10^{-8}$
modificado	2,5	4,5	97	$2,5 \times 10^{-9}$
modificado	5,0	0,1	100	$6,2 \times 10^{-10}$
modificado	7,5	1,9	94	$5,7 \times 10^{-10}$
modificado	10,0	5,2	97	$1,7 \times 10^{-10}$

B = teor de bentonite,  $\Delta w = w - w_{op}$ ; w = teor em água;  $w_{op}$  = teor em água ótimo; DR = densidade relativa ( $=\gamma_d/\gamma_{dmax}$ );  $\gamma_d$  = peso volúmico seco;  $\gamma_{dmax}$  = peso volúmico seco máximo; k = condutividade hidráulica.

Chalermyanont e Arrykul (2005) estudaram o comportamento hidráulico de misturas de areia com bentonite sódica em pó (entre 0 e 9%), compactadas com teor em água 2% superior ao teor em água ótimo Proctor normal. Como observado por Boscov *et al.* (2009), à medida que a percentagem em bentonite aumentava, o teor em água ótimo aumentava e o peso volúmico seco diminuía. Utilizaram permeâmetros de parede rígida (Figura 1.17) e água desionizada como fluido de percolação. Para as misturas com teores em bentonite entre 0% e 9%, a condutividade hidráulica diminuiu de  $3,60 \times 10^{-7}$  para  $4,13 \times 10^{-11}$  m/s. Observaram que a mistura de areia com 3% de bentonite permitia obter uma condutividade hidráulica de  $1 \times 10^{-9}$  m/s.

Querendo compreender de que modo a bentonite preenchia os poros formados pela matriz arenosa, os autores utilizaram um MEV para observar a estrutura da areia e a estrutura das misturas de areia com bentonite. Notaram que a superfície das partículas de areia, sem a presença da bentonite, se encontrava irregular e com o espaço poroso vazio. Pelo contrário, nas misturas de areia com bentonite, a superfície das partículas de areia apresentava-se regular e os vazios preenchidos.

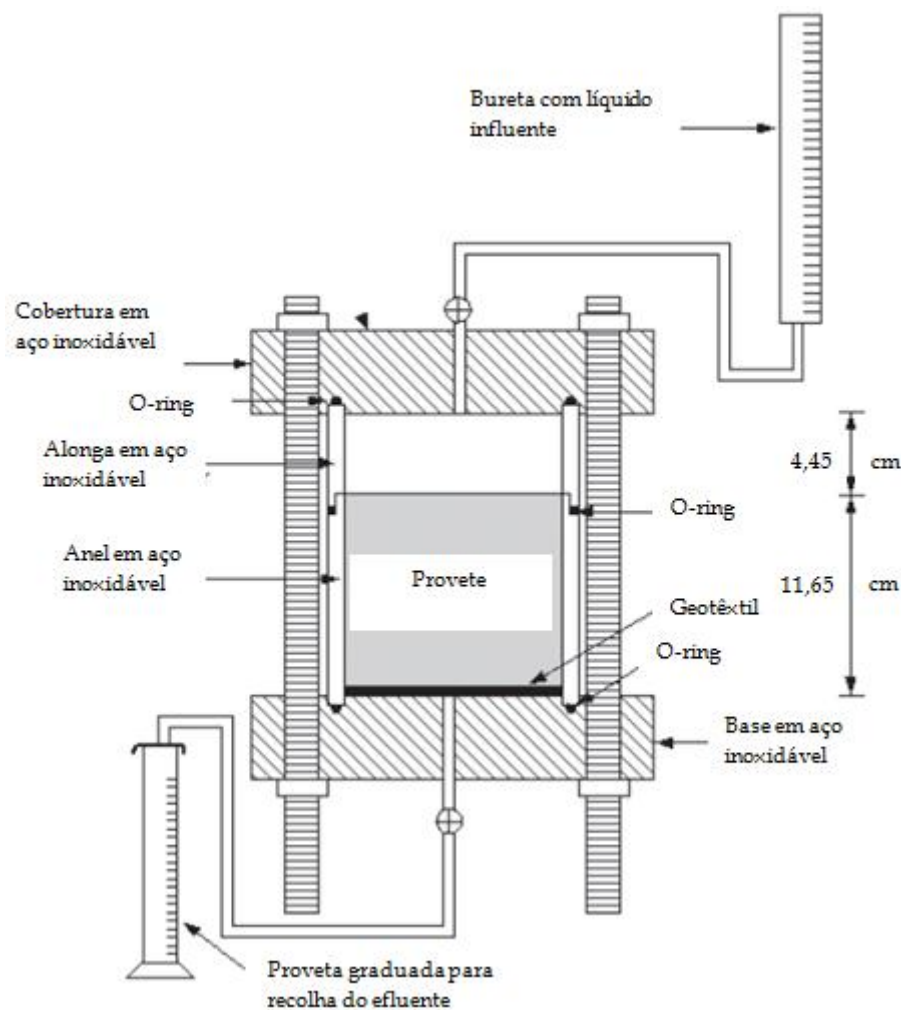


Figura 1.17 - Permeâmetro de parede rígida utilizado por Chalermyanont e Arrykul (2005).

Eid *et al.* (2009) referem que a adição de pequenas quantidades de bentonite (5 a 15%) a um material granular melhora o seu desempenho mecânico e o seu desempenho hidráulico, diminuindo a condutividade hidráulica. Referem também, que a bentonite em pó é muito mais fácil de misturar e compactar *in situ* com solos arenosos do que com solos argilosos.

O objectivo do estudo era a avaliação do desempenho hidráulico de barreiras formadas por misturas de areia-bentonite e geomembranas e de barreiras formadas apenas por misturas de areia-bentonite, tendo em vista a sua utilização como barreiras de confinamento num aterro de resíduos sólidos urbanos, em substituição das barreiras de confinamento argilosas. Os ensaios de laboratório pretendiam observar a compressibilidade, a condutividade hidráulica e o efeito da compactação

nas misturas de areia-bentonite, bem como o efeito de um lixiviado, proveniente de um aterro de resíduos sólidos urbanos a Este do Cairo, no Egipto, na condutividade hidráulica. Para tal, utilizaram como materiais areia, bentonite e geomembrana.

Na determinação da condutividade hidráulica, as misturas de areia-bentonite, com teores de 4, 7, 10 e 14%, foram compactadas com o teor em água óptimo Proctor modificado. A determinação da condutividade hidráulica foi efectuada a partir de ensaios realizados em edómetros.

Para testarem a barreira com a mistura areia-bentonite e com a geomembrana, prepararam uma mistura de areia com 10% de bentonite, misturada com um teor em água óptimo Proctor modificado. Determinaram a condutividade hidráulica utilizando um permeâmetro (os autores não referem de que tipo) e carga variável. O molde foi preenchido com a mistura de areia e 10% de bentonite, compactada em cinco camadas, de forma a obter uma altura de 8 cm. Por cima da mistura foi colocada a geomembrana (GM) de polietileno de alta densidade (PEHD) e o conjunto foi selado com silicone. O conjunto foi inicialmente percolado por água da rede, até à obtenção de um fluxo estável. Alcançada a saturação do provete, a solução percolante foi substituída pelo lixiviado. O ensaio foi repetido várias vezes, com variação do número de orifícios na GM, para avaliação do comportamento da mistura areia-bentonite como barreira passiva.

Algumas das conclusões do estudo são apresentadas em seguida:

- 1) para a condutividade hidráulica das misturas areia-bentonite ser inferior ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, requisito mínimo para a sua aplicação na construção de barreiras de aterros de resíduos sólidos urbanos, o teor em bentonite não deverá ser inferior a 7% do peso da mistura. Para a obtenção de uma mistura económica, o teor em bentonite não deveria ser superior a 10%;
- 2) a redução da condutividade hidráulica foi mais significativa nos provetes percolados pelo lixiviado proveniente do aterro de resíduos sólidos urbanos, do que nos provetes percolados com água da rede. Esta redução é significativamente



maior no caso de um baixo teor em bentonite na mistura e de carga vertical reduzida;

- 3) na barreira construída com a GM como barreira activa, sem furos, e mistura de areia com 10% de bentonite como barreira passiva, a barreira é teoricamente impermeável. Quando a percentagem de furos excede os 0,25% da superfície da GM, a condutividade hidráulica torna-se dependente da condutividade hidráulica da mistura de areia-bentonite. Se a percentagem de furos da GM for ainda maior, para valores da ordem de 0,57%, a condutividade hidráulica aproxima-se dos valores obtidos para as misturas, ou seja  $2,65 \times 10^{-10}$  m/s. Este factor salienta a importância da barreira passiva, que passa a actuar como a única barreira, no caso de ocorrerem cortes na GM.

Gleason *et al.* (1997) estudaram a hipótese de utilizarem bentonite cálcica em barreiras de confinamento hidráulico, comparando-a com a bentonite sódica. A realização do estudo baseou-se na hipótese da bentonite cálcica ser quimicamente mais estável do que a sódica às soluções químicas, podendo garantir por isso um melhor desempenho hidráulico.

Misturaram três tipos de areia diferentes (A, B e C) com bentonite sódica e com bentonite cálcica. As misturas foram efectuadas com teores de bentonite de 0, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 15 e 20% e humidificadas com água da rede. Os teores em água dos provetes variavam, na grande maioria dos casos, entre 15 e 19% (ou seja, 1 a 4% acima do teor em água óptimo Proctor normal). As misturas foram deixadas a hidratar pelo menos 48 horas antes de serem compactadas.

Os valores da condutividade hidráulica foram determinados a partir de ensaios de permeabilidade realizados segundo a norma ASTM D 5084. Na maioria dos ensaios, os provetes foram inicialmente percoladas com água da rede e, após a estabilização da condutividade hidráulica, com uma solução de 0,25 M  $\text{CaCl}_2$ . Outros provetes foram percolados directamente com 0,25 M  $\text{CaCl}_2$ .

Verificaram que, tanto nas misturas tratadas com bentonite sódica, como com bentonite cálcica, havia redução da permeabilidade (Figura 1.18).

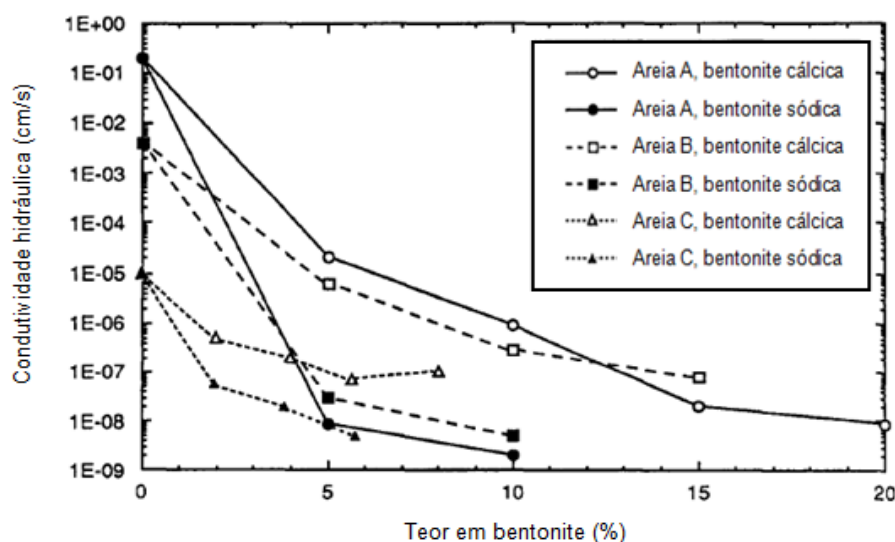


Figura 1.18 - Condutividade hidráulica de misturas de areia com bentonite cálcica e com bentonite sódica, percoladas com água da rede, em função do respectivo teor em bentonite (adaptado de Gleason *et al.*, 1997).

No entanto, nos ensaios com água da rede, era preciso adicionar três vezes mais bentonite cálcica do que sódica para baixar a condutividade hidráulica das misturas para valores inferiores a  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Nos dois tipos de misturas, a substituição da água da rede pela solução de 0,25 M  $\text{CaCl}_2$  foi responsável pelo aumento da condutividade hidráulica dos provetes para valores superiores a  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Também obtiveram resultados semelhantes a estes nos provetes preparados a partir das misturas percoladas directamente com 0,25 M  $\text{CaCl}_2$ . Nos provetes percolados directamente com a solução de 0,25 M  $\text{CaCl}_2$ , a sua substituição pela água da rede produziu apenas uma pequena diminuição na condutividade hidráulica, indicando que a estrutura da mistura após percolação com a solução de 0,25 M  $\text{CaCl}_2$ , era irreversível. Nos provetes percolados directamente com a solução de 0,25 M  $\text{CaCl}_2$ , a percentagem de bentonite cálcica e sódica adicionada à areia para se atingirem valores de condutividade hidráulica inferiores a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, é apresentada na Figura 1.19. Observaram que para o mesmo tipo de areia foi necessário adicionar,

aproximadamente, três vezes mais bentonite cálcica do que sódica, pelo que a premissa inicial não foi confirmada pelos resultados deste estudo, ou seja, para a solução química percolante utilizada, as misturas preparadas com a bentonite sódica não tiveram pior desempenho hidráulico do que as misturas preparadas com a bentonite cálcica.

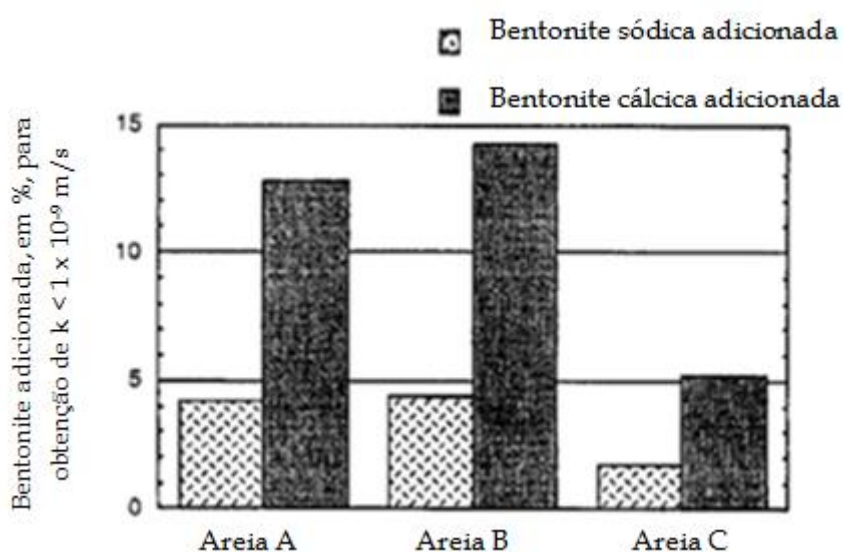


Figura 1.19 - Comparação da percentagem de bentonite cálcica e sódica misturada com o mesmo tipo de areia para se atingir uma condutividade hidráulica inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, em provetes percolados directamente com uma solução de 0,25 M  $\text{CaCl}_2$  (adaptado de Gleason *et al.*, 1997).

Gueddouda *et al.* (2008) realizaram ensaios de permeabilidade em misturas de areia de duna com 3, 5, 10, 12 e 15% de bentonite cálcica. Concluíram que só nas misturas com mais de 12% de bentonite, compactadas com teor em água óptimo Proctor (os autores não especificam se é Proctor normal ou modificado), é que a condutividade hidráulica era inferior a  $1 \times 10^{-8}$  m/s.

Os autores compararam os seus resultados com os obtidos por Ameta e Wayal (2008), tendo observado que as suas misturas necessitavam de mais bentonite do que as misturas de Ameta e Wayal (2008), para obterem valores da mesma ordem de grandeza da condutividade hidráulica, apesar de ambas as areias apresentarem a

mesma distribuição granulométrica. Concluíram que a diferença observada se devia à utilização de bentonite sódica por Ameta e Wayal (2008), em vez da bentonite cálcica que utilizaram no seu estudo.

Heineck *et al.* (2003) misturaram os resíduos (cinzas de fundo e cinzas volantes) provenientes do processo de combustão de carvão mineral, com várias percentagens de bentonite, com o objectivo de diminuir a condutividade hidráulica destes resíduos e avaliar a viabilidade da sua aplicação como barreiras de confinamento de resíduos, promovendo deste forma a sua valorização económica.

Realizaram ensaios de permeabilidade sobre as misturas de cinzas volantes e de cinzas de fundo da combustão do carvão com diferentes percentagens de bentonite (0, 3, 6, 9 e 18%), compactadas pelo método Proctor normal. Realizaram também ensaios de permeabilidade em provetes preparados a partir de areias e de misturas de areias com 18% de bentonite, compactadas com teor em água óptimo Proctor normal. Tanto nas misturas da bentonite com as cinzas, como com a areia, a compactação só foi efectuada após 24 horas de repouso. O Quadro 1.10 apresenta os resultados obtidos para a condutividade hidráulica das misturas de cinzas de fundo, das cinzas volantes e da areia, com as várias percentagens de bentonite.

Quadro 1.10 - Resultados obtidos para a condutividade hidráulica das misturas das cinzas e da areia com as várias percentagens de bentonite (adaptado de Heineck *et al.*, 2003).

Material	Bentonite (%)	k (m/s)
Cinza de fundo	0	$1,78 \times 10^{-6}$
	3	$1,68 \times 10^{-6}$
	6	$7,34 \times 10^{-7}$
	9	$3,06 \times 10^{-7}$
	18	$1,39 \times 10^{-7}$
Cinza volante	0	$5,67 \times 10^{-7}$
	3	$4,25 \times 10^{-7}$
	6	$2,16 \times 10^{-7}$
	9	$1,29 \times 10^{-7}$
	18	$1,12 \times 10^{-7}$
Areia	0	$3,17 \times 10^{-5}$
	18	$5,15 \times 10^{-10}$

Comprovaram que tanto para a cinza de fundo, como para a cinza volante, a adição de bentonite não alterou significativamente a condutividade hidráulica das misturas. No caso das misturas de areia com bentonite, obtiveram uma redução da condutividade hidráulica de  $3,17 \times 10^{-5}$  m/s para  $5,15 \times 10^{-10}$  m/s, ou seja, de cerca de 100.000 vezes.

Concluíram que mesmo adicionando uma grande quantidade de bentonite (18%), os vazios formados pelos grãos porosos e angulosos da cinza não são preenchidos, resultando num material que ainda é muito permeável. No caso da mistura de areia com bentonite, concluíram que o factor preponderante para o comportamento destes materiais era a morfologia dos grãos da matriz das misturas, uma vez que a bentonite ao ser misturada com areia, que possui grãos pouco angulares e sem porosidade interna, mostrou ser capaz de reduzir com grande eficiência a condutividade hidráulica da mistura.

Recorreram a um MEV para comprovarem a existência de poros, observados anteriormente ao microscópio óptico, nas partículas das cinzas volantes. Observaram que a sua morfologia, além de apresentar grãos extremamente angulosos com contactos maioritariamente pontuais, apresentava também grandes poros, de onde

destacaram a existência de um com a dimensão de 16  $\mu\text{m}$ . Observaram também, que para as partículas de areia, onde predominam contactos do tipo longitudinal entre as partículas, a adição de bentonite pode diminuir a condutividade hidráulica. Tanto num caso como noutro, o observado é compatível com os valores de condutividade hidráulica obtidos nos ensaios.

Lukiantchuki e Esquivel (2008) recorreram a permeâmetros de parede flexível para estudarem o comportamento hidráulico de um solo arenoso misturado com 3, 5 e 7% de bentonite sódica e a permeâmetros de parede rígida para estudarem o comportamento hidráulico do mesmo solo arenoso, sem adição de bentonite. Procederam de igual modo, à caracterização geotécnica do solo natural, da bentonite e das misturas solo-bentonite. Para tal, realizaram os seguintes ensaios: granulometria, massa volúmica das partículas, limites de liquidez e de plasticidade e ensaio de compactação Proctor normal.

Concluíram que a adição de bentonite ao solo natural aumentava o peso volúmico das partículas e o limite de liquidez, enquanto o limite de plasticidade não apresentou variação significativa. Os valores dos parâmetros de compactação do solo natural sofreram alterações devido à adição da bentonite: o peso volúmico seco máximo diminuiu e o teor em água ótimo aumentou, com o aumento da percentagem de bentonite adicionada. Com os teores de 5% e 7% de bentonite, obtiveram valores na ordem dos  $10^{-9}$  m/s para a condutividade hidráulica. O Quadro 1.11 apresenta uma síntese dos resultados obtidos na caracterização do solo e das misturas.

Quadro 1.11 - Síntese dos resultados obtidos na caracterização do solo arenoso, das misturas solo-bentonite e da bentonite (adaptado de Lukiantchuki e Esquivel, 2008).

Propriedades		Solo arenoso	Solo arenoso +3%bentonite	Solo arenoso +5%bentonite	Solo arenoso +7%bentonite	Bentonite
$\rho_s$ (kN/m <sup>3</sup> )		25,62	26,15	26,16	26,25	27,69
Limites de consistência	w <sub>L</sub> (%)	26	36	39	42	455
	w <sub>P</sub> (%)	17	16	17	17	54
	I <sub>P</sub> (%)	9	20	22	25	401
Classificação Unificada		SC – Areias argilosas				-
$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )		18,52	18,13	17,93	17,50	-
w <sub>opn</sub> (%)		13,0	14,5	14,6	15,5	-

Magistris *et al.* (1998) analisaram as propriedades mecânicas e físicas de uma areia siltosa e das misturas deste material com diferentes percentagens em bentonite (0,5, 1,3, 2,5 e 5%), tendo em vista a construção do núcleo de uma barragem de aterro, no sul de Itália.

Para o estudo da condutividade hidráulica utilizaram permeâmetros de parede rígida. Às misturas, preparadas manualmente, adicionaram a quantidade de água necessária para obterem provetes com o teor em água ótimo Proctor modificado. Após a humificação, as amostras foram conservadas num recipiente hermético durante um período mínimo de pelo menos 16 horas. No permeâmetro, as extremidades dos provetes ficavam em contacto com uma pedra porosa. Não foi utilizado papel de filtro para permitir a migração da bentonite que pudesse ser lavada. Como ilustra a Figura 1.20, com o aumento do teor em bentonite houve uma diminuição na condutividade hidráulica. Também registaram um aumento no índice de plasticidade e uma diminuição no peso volúmico seco máximo Proctor modificado, com o aumento do teor em bentonite.

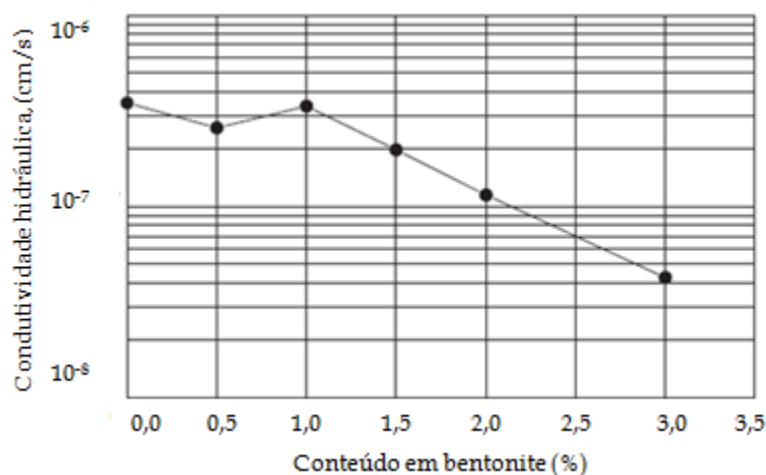


Figura 1.20 - Condutividade hidráulica das misturas da areia siltosa com a bentonite *versus* o teor em bentonite, compactadas com teor em água ótimo Proctor modificado (adaptado de Magistris *et al.*, 1998).

Marcotte *et al.* (1994) referem que as misturas de areia-bentonite são uma das tecnologias mais económicas na construção de barreiras de confinamento hidráulico em lagoas de águas residuais. Indicam que o desempenho hidráulico deste tipo de barreiras pode ser influenciado por vários factores, como:

- 1) a percentagem e o tipo de bentonite;
- 2) a percentagem de finos (diâmetro  $< 80\mu\text{m}$ );
- 3) a granulometria e a composição mineralógica da areia;
- 4) a densidade e a porosidade da areia;
- 5) a composição química da água residual;
- 6) o grau de compactação e saturação da areia.

O seu trabalho envolveu o estudo da condutividade hidráulica de misturas de areia com percentagens de bentonite sódica que variaram entre os 2,5 e os 11,1%, para a construção de uma barreira numa lagoa municipal de águas residuais. Para tal, utilizaram dois tipos de areia: a que existia no local (Areia A) e a que recolheram numa mancha de empréstimo existente nas imediações (Areia B). A Areia A



apresentava um teor de finos (diâmetro  $< 80 \mu\text{m}$ ) na ordem dos 2 - 8%, enquanto a Areia B apresentava um teor de finos de 42,5%. As misturas foram preparadas, adicionando a bentonite à Areia A, ou, então, adicionando a bentonite a uma mistura previamente preparada a partir da Areia A e da Areia B. A mistura dos dois tipos de areia visava aumentar a percentagem de finos, permitindo assim observar a influência do conteúdo em finos na condutividade hidráulica.

As misturas foram compactadas com o teor em água ótimo Proctor modificado e a sua condutividade hidráulica foi determinada através de permeâmetros de parede flexível, sujeitos a um gradiente hidráulico que variou entre 20,5 e 26,9 (valores semelhantes às condições reais *in situ*).

Após 45 dias de ensaio, observaram que ocorria a lavagem da bentonite em quatro provetes, dos onze ensaiados. Cada um dos provetes foi observado macroscopicamente e com o auxílio de uma lupa. Os provetes onde ocorreu a lavagem da bentonite apresentavam-se similares aos provetes onde não tinha havido a lavagem da bentonite.

Os resultados da condutividade hidráulica das misturas ensaiadas por estes autores encontram-se no Quadro 1.12.

Quadro 1.12 - Resultados obtidos para a condutividade hidráulica das misturas areia-bentonite (adaptado de Marcotte *et al.*, 1994).

Amostra	Teor de finos (diâmetro $< 80 \mu\text{m}$ ) (%)	Bentonite (%)	Condutividade hidráulica (m/s)
1	2,2	4,1	$2 \times 10^{-3}$
2	2,2	5,2	$2 \times 10^{-3}$
3	2,2	7,5	$2 \times 10^{-9}$
4	2,2	11,1	$< 2 \times 10^{-9}$
5	5,0	5,0	$4 \times 10^{-9}$
6	8,5	2,5	$2 \times 10^{-3}$
7	8,5	7,0	$< 4 \times 10^{-9}$
8	9,0	3,0	$2 \times 10^{-9}$
9	9,0	4,0	$6 \times 10^{-9}$
10	9,0	5,5	$3 \times 10^{-9}$
11	9,0	7,0	$< 4 \times 10^{-9}$

Os autores chegaram às seguintes conclusões:

- 1) na construção de barreiras de confinamento hidráulico, as areias mal calibradas, com uma pequena percentagem de finos, devem ser evitadas, devido ao fenómeno da lavagem da bentonite, mais propícia de ocorrer nestas situações;
- 2) o processo e a eficiência da mistura é um factor chave para evitar grandes adições de bentonite;
- 3) a mistura de areia com diferentes percentagens de finos pode ser utilizada para evitar a adição de elevadas percentagens de bentonite.

Sällfors e Öberg-Högsta (2002) referem, tendo por base a recolha bibliográfica efectuada, que na construção de uma barreira de confinamento hidráulico há vários factores que podem influenciar a condutividade hidráulica da mistura, tendo enumerado os seguintes:

- 1) **Percentagem de bentonite**: Quanto maior for a percentagem de bentonite, mais baixa é a permeabilidade. No entanto, como o custo da bentonite é elevado, o objectivo é determinar a percentagem mínima necessária para se atingir a condutividade hidráulica pretendida. Normalmente, a quantidade de bentonite a adicionar numa mistura com areia tendo em vista a sua aplicação na construção de uma barreira de confinamento hidráulico, varia entre 4 e 13% do peso seco da massa total da mistura. Quantidades maiores de bentonite tendem a tornar a mistura plástica e difícil de compactar;
- 2) **Teor em água de compactação**: A compactação mais efectiva é atingida quando a mistura areia-bentonite é preparada com um teor em água próximo do teor em água óptimo ou ligeiramente superior (cerca de 2%), conforme referido na secção 1.4. A compactação efectuada no ramo húmido permite uma melhor

homogeneização da mistura e da colmatação do espaço poroso, enquanto a compactação no ramo seco é responsável, geralmente, pela formação de vazios de maiores dimensões e por consequência por misturas compactadas com condutividade hidráulica mais elevada;

- 3) **Tipo de bentonite:** As bentonites mais comuns são a sódica e a cálcica, sendo a sódica a que apresenta maior expansibilidade e, por consequência, menor permeabilidade, conforme referido oportunamente. Dado que o comportamento hidráulico das bentonites depende das características químicas da solução percolante, esse facto deve ser tido em consideração na selecção da bentonite a utilizar na mistura;
- 4) **Composição granulométrica do material de base:** A granulometria do solo de base utilizado nas misturas tem influência na condutividade hidráulica final. Um solo grosseiro terá uma condutividade hidráulica maior do que um solo fino, devido à distribuição dos vazios. Um solo bem graduado, quando compactado, terá uma condutividade hidráulica menor do que um mal graduado, pelo que se torna necessário um bom conhecimento da granulometria do solo antes da adição da bentonite;
- 5) **Tempo:** A areia, ou outro solo granular natural, e a bentonite são muitas vezes misturadas no estado seco e posteriormente humidificadas para o teor em água óptimo de compactação. No final do ensaio, o teor em água do material deve ser controlado para verificar o seu grau de saturação, já que, como é sabido, influencia a sua condutividade hidráulica.

O trabalho destes autores consistiu no estudo da condutividade hidráulica de misturas de três tipos de areia (Quadro 1.13) com bentonite sódica (em forma de pó);

em especial na variação da condutividade hidráulica em função da percentagem em bentonite, da compactação e do grau de saturação. Os ensaios de permeabilidade foram realizados em células triaxiais, a carga variável, sem aplicação de contra-pressão na saturação dos provetes. Em vez disso, permitiram que a bentonite saturasse gradualmente com a ascensão da água. Os resultados que obtiveram encontram-se no Quadro 1.14.

Quadro 1.13 - Granulometria dos três tipos de areia utilizados nas misturas com a bentonite (adaptado de Sällfors e Öberg-Högsta, 2002).

<b>Dimensão das partículas</b>	<b>%</b>
<b>Areia média 1</b>	
2 mm - 0,6 mm	26
0,6 mm - 0,2 mm	37
0,2 mm - 0,06 mm	22
<b>Areia média 2</b>	
2 mm - 0,6 mm	32
0,6 mm - 0,2 mm	25
0,2 mm - 0,06 mm	14
<b>Areia grosseira</b>	
2 mm - 0,6 mm	30
0,6 mm - 0,2 mm	18
0,2 mm - 0,06 mm	12

Quadro 1.14 - Resultados obtidos por Sällfors e Öberg-Högsta (2002) para a condutividade hidráulica de misturas areia-bentonite.

Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Teor em água inicial (%)	Bentonite (%)	Condutividade hidráulica (m/s)
Areia média 1				
1	16,87	15	4	$6,0 \times 10^{-10}$
2	16,57	15	4	$5,0 \times 10^{-10}$
Areia média 2				
1	16,57	15	4	$1,0 \times 10^{-9}$
2	17,16	15	6	$5,0 \times 10^{-10}$
Areia grossa				
1	16,38	20	8	$3,2 \times 10^{-9}$
2	15,98	20	7	$5,0 \times 10^{-8}$
3	17,65	10	8	$5,5 \times 10^{-8}$
4	19,52	10	8	$2,0 \times 10^{-10}$

Sivapullaiah, *et al.* (2000) avaliaram a condutividade hidráulica, de siltes, de areias grossas e de areias finas misturadas com diferentes percentagens de bentonite (5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 65, 80 e 100%), para posterior aplicação na construção de barreiras de confinamento hidráulico. As misturas foram ensaiadas num edómetro de anel rígido. A superfície interna do anel foi revestida com silicone para minimizar o atrito com a amostra. No topo e na base do provete colocaram uma folha de papel de filtro, de modo a evitar que as partículas finas colmassem a pedra porosa, em particular a inferior. Os autores concluíram que o log de k diminuía com o aumento da percentagem de bentonite (Figura 1.21). Observaram de igual forma que o efeito da fracção grossa nos valores de k apenas era observável nas misturas com pequenas percentagens em bentonite.

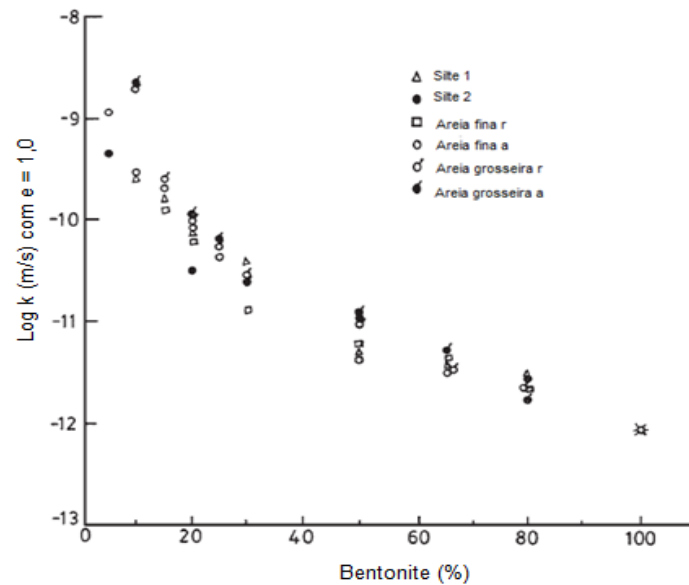


Figura 1.21 - Relação entre a condutividade hidráulica e a percentagem de bentonite nas diferentes misturas estudadas (adaptado de Sivapullaiah *et al.*, 2000).

Studds *et al.* (1998) estudaram a condutividade hidráulica e o comportamento expansivo de misturas de areia com bentonite (10% e 20% em relação ao peso total) utilizando como percolante água destilada e soluções salinas com diferentes concentrações (0,01, 0,1 e 1 mol/l). No estudo da condutividade hidráulica utilizaram células de Rowe, tendo os ensaios de permeabilidade sido realizados a carga constante, e medição da expansibilidade a carga controlada. As principais tendências que observaram foram:

- 1) para um dado índice de vazios da mistura areia-bentonite, a condutividade hidráulica da mistura é menor com 10% de bentonite do que com 20% de bentonite;
- 2) a condutividade hidráulica de cada mistura aumenta com o aumento do índice de vazios na mistura areia-bentonite.

Uma das conclusões a que chegaram foi que a condutividade hidráulica de uma mistura areia-bentonite a soluções aquosas pode ser prevista a partir da

condutividade hidráulica da bentonite a uma solução apropriada e da porosidade e tortuosidade da matriz arenosa.

Yanful e Shikatani (1995) estudaram a condutividade hidráulica de uma mistura de areia-bentonite à água destilada e a uma solução ácida proveniente de resíduos de mineração. A mistura foi realizada utilizando uma areia média e bentonite sódica, na proporção de 92% para 8%, respectivamente. As misturas foram compactadas pelo método Proctor normal. A condutividade hidráulica média das misturas foi de  $1,6 \times 10^{-11}$  m/s, com água destilada e  $2,4 \times 10^{-11}$  m/s, com solução ácida. Concluíram que o ligeiro aumento na condutividade hidráulica poderá ter tido origem na transformação parcial de alguma montmorilonite (mineral argiloso presente em maior percentagem) e ilite em caulinite.

## 1.6. ESTUDOS *IN SITU*. DESEMPENHO HIDRÁULICO DE BARREIRAS DE CONFINAMENTO CONSTRUÍDAS COM MISTURAS SOLO-BENTONITE

Esta secção apresenta, de forma resumida, alguns casos práticos sobre o desempenho hidráulico *in situ* de barreiras de confinamento de misturas de solo-bentonite.

Alston *et al.* (1997) apresentam um caso de estudo, que envolveu o projecto (Fase I) e a construção (Fase II) de uma barreira de areia-bentonite, para aplicação numa lagoa de tratamento de efluentes, sita em Marathon, Ontário.

### Fase I

Na primeira abordagem ao problema, consideraram que se a mistura de areia-bentonite fosse preparada utilizando como material de base a areia do local de implementação da obra, a percentagem de bentonite a adicionar teria que rondar os 12-14%, obtendo-se assim as especificações necessárias. No entanto, concluíram que seria economicamente inviável adicionar estas percentagens de bentonite. Para evitarem esta situação, optaram por modificar a granulometria do solo natural, adicionando partículas finas (siltes), conseguindo desta forma diminuir os vazios a serem preenchidos pela bentonite. Seleccionaram siltes provenientes de três áreas de empréstimo distintas (A, B e C), situadas nas imediações do local de construção.

De modo a satisfazer as necessidades do empreiteiro, que pretendia uma condutividade hidráulica máxima de  $1 \times 10^{-9}$  m/s, estabeleceram um programa laboratorial inicial visando a obtenção de  $k = 1 \times 10^{-10}$  m/s. A Figura 1.22 representa um provete preparado a partir das misturas de areia-bentonite montado no permeâmetro. Após a montagem dos provetes nos permeâmetros, estes foram imersos em água por um período de 1 a 2 dias. Os ensaios de permeabilidade foram realizados a carga variável, com duas soluções percolantes: inicialmente com água da rede, e, em seguida, com uma solução obtida através da percolação de pasta de papel. Durante os ensaios de laboratório, verificaram que uma mistura de areia e silte



na proporção de 80:20, com 4% de bentonite, permitia a obtenção de valores de  $k$  inferiores a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, com água da rede como solução percolante. Ao aumentar o teor em bentonite para 6%, com a mesma proporção de areia e silte (80:20), obtinham valores para  $k$  inferiores a  $1 \times 10^{-10}$  m/s. Com proporções de areia e silte de 75:25 e com 4 e 5% de bentonite, obtiveram valores de  $k$  de  $2 \times 10^{-10}$  m/s e  $0,9 \times 10^{-10}$  m/s, respectivamente.

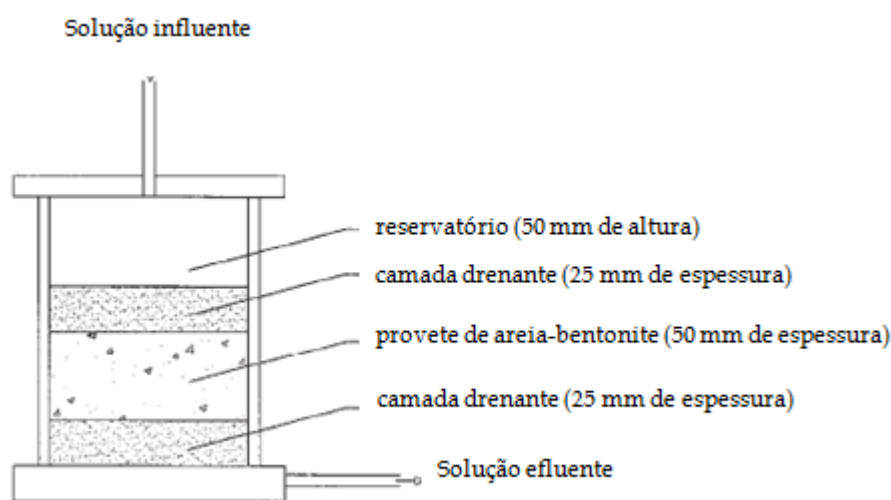


Figura 1.22 - Permeâmetro utilizado nos ensaios de permeabilidade com montagem do provete da mistura areia-bentonite de compactação (adaptado de Alston *et al.*, 1997).

Na concepção final das misturas, a ensaiar em laboratório, utilizaram uma proporção areia:silte de 75:25 e 70:30, com percentagens em bentonite de 5, 5,5 e 6%. Realizaram, de igual forma, ensaios de permeabilidade sobre provetes com as mesmas proporções de areia e silte, mas sem adição de bentonite. Os resultados obtidos nestes ensaios foram utilizados para servirem de referência aos resultados obtidos nos provetes das misturas com bentonite. Os ensaios realizados seguiram a metodologia utilizada nos primeiros ensaios, referida anteriormente. Optaram, novamente, por hidratar os provetes com água, antes da percolação com a solução de pasta de papel. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 1.15.

Quadro 1.15 - Resultados para a condutividade hidráulica das misturas finais (adaptado de Alston *et al.*, 1997).

Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Bentonite adicionada (%)	Solução percolante	k (m/s)	Duração do ensaio (dias)
1	75	25	0	água da rede	$1,3 \times 10^{-7}$	3
2	70	30	0	água da rede	$1,2 \times 10^{-7}$	3
3	75	25	6	água da rede	$4,2 \times 10^{-11}$	41
				sol. pasta de papel	$4,5 \times 10^{-11}$	84
4	75	25	5,5	água da rede	$6,6 \times 10^{-11}$	33
				sol. pasta de papel	$5,2 \times 10^{-11}$	84
5	70	30	5,5	água da rede	$6,2 \times 10^{-11}$	33
				sol. pasta de papel	$5,5 \times 10^{-11}$	53
6	75	25	5	água da rede	$7,2 \times 10^{-11}$	17
				sol. pasta de papel	$6,7 \times 10^{-11}$	53
7	70	30	5	água da rede	$1,0 \times 10^{-10}$	17
				sol. pasta de papel	$9,2 \times 10^{-11}$	41
8	70	30	6	sol. pasta de papel	$3,8 \times 10^{-11}$	51

## Fase II

A determinação da melhor metodologia para a construção da barreira envolveu, mais uma vez, uma série de ensaios para a determinação da viabilidade técnica da mistura e da sua condutividade hidráulica *in situ*. Para tal, construíram, no local de realização da obra, um aterro experimental numa secção da base da lagoa. A barreira com as misturas de areia-bentonite tinha uma espessura de 0,3 metros e foi construída em duas camadas de 0,15 metros. Os materiais foram compactados com teores em água óptimos e +2% do teor em água ótimo, para o método Proctor normal.

Ao compactar a mistura de areia-bentonite, o empreiteiro observou que o material com teor em água 2% superior ao teor em água ótimo era de difícil compactação, devido à aderência do solo ao cilindro. Verificou, que a compactação era mais fácil se o teor em água da mistura estivesse no teor em água ótimo ou ligeiramente abaixo.

O controlo de qualidade da mistura, *in situ*, foi realizado através da determinação:

- 1) do grau de compactação;

- 2) do teor em bentonite;
- 3) da granulometria;
- 4) da condutividade hidráulica.

Os resultados obtidos para a condutividade hidráulica através de ensaios de permeabilidade realizados em furos de sondagem, com os respectivos valores para o grau de compactação e o teor em bentonite, são apresentados no Quadro 1.16.

Quadro 1.16 - Resultados obtidos nos testes de controlo de qualidade, em cada local da zona de ensaio, para a mistura de areia-bentonite (adaptado de Alston *et al.*, 1997).

Amostra	Granulometria (%)				Bentonite (%)	Grau de compactação	k (m/s)	Duração do ensaio (dias)
	Cascalho	Areia	Silte	Argila				
1	5,2	69,2	20,2	5,4	5,29	98	$3,1 \times 10^{-10}$	17
2	5,2	69,2	20,2	5,4	5,29	98	$2,5 \times 10^{-10}$	12
3	1,4	66,7	26,9	5,0	5,44	100	$3,1 \times 10^{-10}$	5
4	4,9	73,4	17,0	4,7	5,35	100	$4,1 \times 10^{-10}$	10
5	3,7	73,1	18,6	4,6	5,16	99	$3,1 \times 10^{-10}$	11
6	4,9	73,4	17,0	4,7	5,35	97	$1,8 \times 10^{-10}$	12
7	1,0	72,7	20,9	5,4	5,08	97	$1,0 \times 10^{-10}$	10
8	2,9	70,7	21,6	4,8	5,36	96	$2,5 \times 10^{-10}$	14

Estes resultados obtidos mostram que  $k$  varia entre  $1,0$  e  $4,1 \times 10^{-10}$  m/s, após um período de ensaio de 5 a 17 dias. Os valores determinados para a condutividade hidráulica *in situ*, são aproximadamente 1,5 vezes maiores do que os valores obtidos em laboratório. Segundo os autores, estes resultados podem-se dever ao tempo de ensaio, que não deverá ter tido a duração suficiente, devido aos prazos impostos para a execução da obra. Referem ainda que o facto de não ter sido aplicada nenhuma sobrecarga, também pode ter influenciado os valores obtidos, além da fase de hidratação da amostra ter sido reduzida, mais uma vez devido aos prazos impostos para a execução da obra.

No entanto, após a construção da barreira definitiva, criaram um sistema de monitorização de modo a observarem o seu comportamento. Verificaram que a percolação e o risco de contaminação da água subterrânea eram mínimos.

Boscov *et al.* (2009) compararam o comportamento hidráulico de duas camadas, compactadas *in situ*, construídas a partir de um solo siltoso local e de uma mistura deste solo com 5% de bentonite. As dimensões de cada camada foram as seguintes: 10 m de largura, 20 m de comprimento e 0,60 m de espessura. As especificações para a realização da compactação foram as seguintes: grau de compactação mínimo de 95% relativamente ao peso volúmico seco máximo Proctor modificado, teor em água de compactação igual ou superior em 4% ao teor em água ótimo Proctor modificado. De cada camada, recolheram três amostras indeformadas para efectuarem os ensaios de permeabilidade, onde utilizaram um gradiente hidráulico igual a 30. A condutividade hidráulica média obtida foi de  $3,6 \times 10^{-8}$  m/s para o solo natural e de  $3,0 \times 10^{-9}$  m/s para a mistura. A adição de bentonite ao solo siltoso viabilizou a sua utilização na construção da barreira de confinamento hidráulico do aterro de resíduos projectado para o local, evitando o transporte de solo argiloso a partir de uma mancha de empréstimo situada a cerca de 50 km da obra. Os ensaios efectuados na barreira de confinamento também mostraram a necessidade de se proceder à mistura cuidadosa do solo com a bentonite, à programação da compactação para evitar os períodos de precipitação atmosférica (a exposição das camadas pode prejudicar o contributo expansivo dos materiais que a constituem), e à utilização de amostras representativas nos ensaios laboratoriais, visto que a compactação no campo não é tão eficaz na desagregação do solo, podendo ser responsável pela existência de zonas com diferentes valores de condutividade hidráulica.

Chapuis (2002) apresentou um trabalho onde referiu os problemas que poderão ocorrer em barreiras de confinamento construídas com materiais argilosos e misturas solo-bentonite, e que normalmente não são levados em conta.

Muitas células de aterros de resíduos e de lagoas são impermeabilizadas recorrendo à compactação de materiais argilosos e de misturas de solo-bentonite. No Quebec, por exemplo, foram construídas mais de 450 lagoas e células para aterros de resíduos desde 1980, envolvendo mais de 1.000 barreiras de confinamento. O desempenho de qualquer barreira depende de muitos pormenores do projecto, da construção e do controlo de qualidade da construção. Há vários tipos de ensaios laboratoriais e de campo que se podem realizar para avaliar o desempenho do sistema de confinamento em termos de fugas totais. Todavia, esta avaliação, geralmente, ignora a grande influência dos pequenos defeitos nas fugas e também as interações entre a barreira de confinamento e os materiais da camada de drenagem.

O autor apresentou vários casos práticos que ilustravam alguns dos problemas observados nas barreiras de confinamento hidráulico utilizadas em aterros de resíduos:

- 1) excesso de fugas numa mistura estável de solo-bentonite;
- 2) lavagem da bentonite de uma mistura solo-bentonite;
- 3) erosão interna numa camada de argila natural através de um filtro de areia dimensionado de forma inadequada;
- 4) efeitos da congelação na ocorrência das fugas numa barreira argilosa.

No interesse desta dissertação, apenas se apresentam os casos de estudo (A e B) em que Chapuis (2002) trata das barreiras construídas com misturas de solo-bentonite.

**Caso A:** Em 1988 foram construídas 4 lagoas no âmbito de um projecto municipal de Tratamento de Águas Residuais. O local de construção, na margem esquerda do terraço fluvial de um rio, era constituído por um depósito de areia fina, relativamente

permeável, com o nível freático distante da superfície (os autores não indicam a profundidade). Após um estudo comparativo, a solução adoptada foi proceder à mistura da areia fina local com bentonite. O valor para a  $k$  da barreira, medida *in situ*, tinha que ser inferior a  $2 \times 10^{-8}$  m/s, numa camada com a espessura de 0,2 m. De acordo com a análise granulométrica efectuada à areia fina, esta continha entre 4 e 17% de finos. Nas misturas estudadas nos ensaios de permeabilidade, realizados em laboratório, utilizaram a areia fina com a menor percentagem em finos (4,3%) e com o teor em água óptimo mais baixo obtido nas curvas Proctor. De acordo com os resultados obtidos, para percentagens de bentonite na mistura superiores a 7%, os valores de  $k$  eram inferiores a  $2 \times 10^{-8}$  m/s.

De modo a terem em conta as condições de campo, as barreiras foram construídas com uma percentagem em bentonite de 7,7%. Durante a realização dos ensaios à escala real para avaliação do desempenho das barreiras, observaram que as lagoas 1 e 4 apresentavam condições de operação normais e que a taxa de fuga total foi inferior ao valor máximo estabelecido nas especificações técnicas. As lagoas 2 e 3, no entanto, não encheram totalmente devido à elevada taxa de fuga. A análise da percolação total da lagoa 3 revelou dois elementos importantes. Primeiro, que a barreira de confinamento basal da lagoa era aproximadamente 10 vezes mais permeável do que a barreira de confinamento no talude. Segundo, não houve alteração da condutividade hidráulica da barreira durante o ensaio de desempenho.

Noutro trabalho, Chapuis *et al.* (1992) (*in* Chapuis, 2002), fizeram uma análise detalhada dos parâmetros que influenciaram o desempenho da barreira construída na lagoa 3. Concluíram que a baixa percentagem de finos (0-4%) na areia fina utilizada na base da barreira foi um factor determinante no seu fraco desempenho, devido à sua elevada permeabilidade. A outra razão apontada foi a variabilidade, *in situ*, da percentagem de bentonite na mistura, que não foi correctamente tida em atenção. Concluíram de igual forma que as lagoas 1 e 4 tiveram um melhor desempenho devido à areia fina apresentar um maior conteúdo em finos (10-20%), que compensou o efeito da variabilidade da percentagem de bentonite na mistura.

Nas lagoas 2 e 3, os efeitos das variáveis já mencionadas foram responsáveis pela obtenção de valores médios de  $k$ , 11 a 17 vezes superiores ao pretendido pelas especificações técnicas.

Tal conclusão foi importante na abordagem das medidas a adoptar na reparação das lagoas 2 e 3, já que evidenciou que a capacidade de confinamento da barreira não foi influenciada por fenómenos de erosão interna ou de lavagem da bentonite, evitando-se a escavação da barreira para encontrar estas anomalias. De entre as várias soluções analisadas (*in* Chapuis *et al.*, 1992), os autores optaram pela utilização de lamas bentoníticas, de viscosidade adequada, que permitiram diminuir a permeabilidade da barreira, e, assim, obter os valores para as fugas, requeridos pelo regulamento utilizado.

**Caso B:** As barreiras das lagoas foram construídas com misturas de areia local e bentonite. Todas as lagoas foram testadas em termos de fugas totais no final da construção. Através da observação do gráfico da Figura 1.23, verifica-se que o valor de  $k$  aumentou durante os ensaios à escala real, indicando um problema de erosão interna. O ensaio de desempenho foi interrompido após uns dias. Depois de removerem toda a água e a camada de protecção, observaram que a cor da mistura não era uniforme. No lugar da cor cinzenta antes do ensaio, apresentava várias manchas amareladas. Devido à sua textura, as zonas amareladas pareciam ter perdido toda a bentonite. A análise de várias amostras, comprovou que as partículas de bentonite foram lavadas daquelas zonas. As partículas de bentonite tinham migrado da mistura, através de um geotêxtil (abertura de 80  $\mu\text{m}$ ) e de uma camada de areia ( $D_{15}$  entre 0,25 e 0,30 mm), subjacentes.

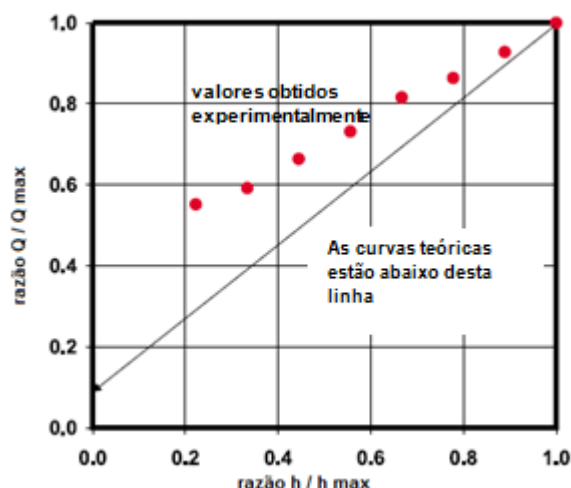


Figura 1.23 - Caso B, barreira com solo-bentonite: fuga total adimensional da lagoa 2 (adaptado de Chapuis, 2002).

Daniel e Koerner (1995) (*in* Bonaparte *et al.*, 2002) referem que o parâmetro mais importante numa mistura de solo-bentonite é a quantidade de bentonite adicionada à mistura. A Figura 1.24 apresenta os valores da condutividade hidráulica, medida *in situ*, em função da percentagem em bentonite. Verificaram que a condutividade hidráulica diminuiu à medida que a percentagem em bentonite aumentou. No entanto, a dispersão ( $r^2 = 0,28$ ) dos dados é significativa e existem poucos valores na base de dados.



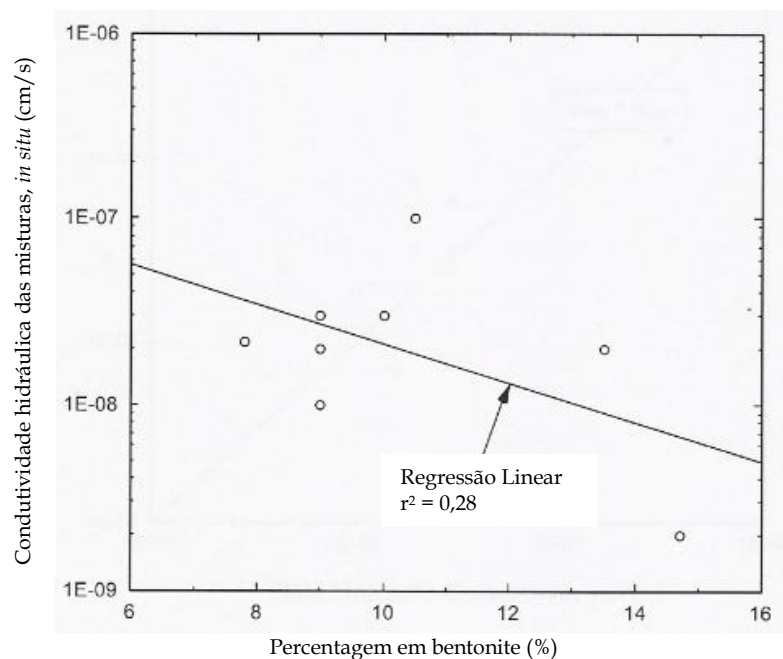


Figura 1.24 - Condutividade hidráulica das misturas versus percentagem em bentonite, *in situ* (adaptado de Bonaparte *et al.*, 2002).

No mesmo estudo, que também envolvia a compilação de casos de barreiras hidráulicas construídas com solos naturais, os autores referem que nos solos naturais, o teor em água de compactação em relação ao teor em água ótimo, era uma variável importante. No caso das barreiras de misturas de solo-bentonite, este não era o factor com maior influência (Figura 1.25), mas sim o grau de compactação (Figura 1.26).

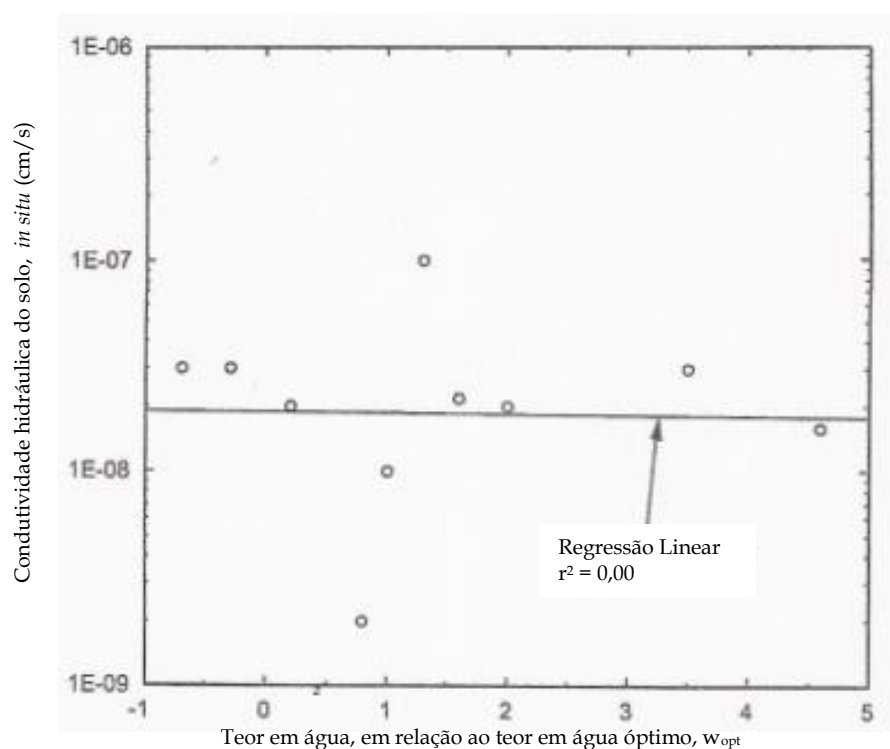


Figura 1.25 - Condutividade hidráulica do solo versus teor em água em relação ao teor em água ótimo, *in situ* (adaptado de Bonaparte *et al.*, 2002).

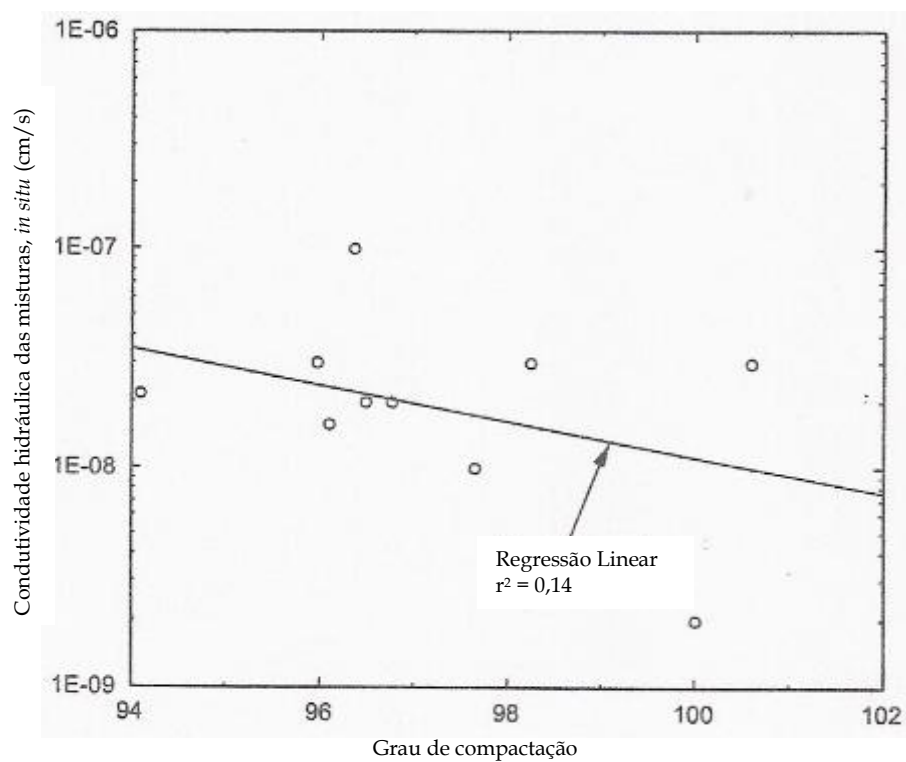


Figura 1.26 - Condutividade hidráulica das misturas versus grau de compactação, *in situ* (adaptado de Bonaparte *et al.*, 2002).

## 1.7. CONCLUSÕES

Os minerais argilosos são os principais constituintes dos solos argilosos, condicionando a maior parte das suas propriedades. A sua divisão estrutural faz-se segundo 7 modelos, que correspondem a sete grupos sistemáticos, entre os quais se destacam, o da esmectite (com maior carácter expansivo), o da illite e o da caulinite.

Considerando as características gerais dos minerais de argila e os requisitos mínimos habitualmente exigidos para a condutividade hidráulica das barreiras de confinamento hidráulico, ou seja  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s, na pesquisa bibliográfica realizada foi dada prioridade à caracterização e comportamento das bentonites, por serem as mais indicadas para tratar os finos produzidos nas pedreiras de granito do Grupo Mota-Engil, que se pretendem reciclar através da sua aplicação na construção de obras geotécnicas com funções ambientais. De uma forma geral, as bentonites correspondem a partículas muito finas, com elevada capacidade de expansão. Cerca de 60 a 80% da composição mineralógica da bentonite corresponde à Montmorilonite, podendo, no entanto, apresentar também Illite e Caulinite. Industrialmente, existem dois tipos de bentonite, as cálcicas e as sódicas. As bentonites sódicas são mais expansivas e, como tal, é mais comum a sua utilização no confinamento de obras geotécnicas. Das particularidades abordadas sobre as bentonites, é importante destacar que:

- 1) de todos os minerais argilosos, a Montmorilonite (principal constituinte das bentonites) é a que apresenta a maior superfície específica, a maior capacidade expansiva e os limites de consistência mais elevados;
- 2) as bentonites apresentam maior expansibilidade com água do que com outras soluções;
- 3) as bentonites sódicas, quando comparadas com as cálcicas, são as mais apropriadas para a utilização em barreiras de confinamento hidráulica devido à sua elevada expansibilidade.

Como referido anteriormente, o principal objectivo da presente dissertação, é avaliar a viabilidade da utilização de misturas de finos de duas pedreiras de granito com bentonite na construção de barreiras de confinamento hidráulico com condutividade hidráulica inferior ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Como tal, a pesquisa bibliográfica abrangeu a recolha de estudos laboratoriais sobre misturas de solos com bentonite, em particular os interessados no comportamento hidráulico. Importa salientar que na bibliografia consultada não foram encontrados estudos geotécnicos sobre misturas de finos de pedreira com bentonite, tendo em vista as aplicações estudadas neste trabalho. Atendendo, porém, às características geotécnicas dos finos das pedreiras, considerou-se possível e relevante para o estudo corrente, os conhecimentos adquiridos nos estudos sobre misturas de solos naturais com bentonite, nomeadamente, sobre as metodologias utilizadas na preparação das misturas, os equipamentos utilizados e os ensaios para a caracterização índice, física e hidráulica. Observou-se que, de uma forma geral, as misturas foram preparadas a partir de areias com várias percentagens de bentonite.

A bibliografia consultada revelou que a maioria dos estudos ignorou a determinação de propriedades índice e de algumas físicas, pretendendo apenas a determinação da condutividade hidráulica das misturas. Relativamente aos equipamentos verificou-se que existe uma ampla variedade, sendo que todos permitem a determinação de  $k$ , embora de diferentes maneiras.

Por último, foram apresentados estudos realizados *in situ* sobre o desempenho hidráulico de barreiras de confinamento.

O importante a reter desta pequena abordagem sobre estudos de barreiras de confinamento com misturas de solo-bentonite foi a utilização de percentagens de bentonite inferiores a 15%, evitando assim custos elevados. O outro factor, que também tem grande influência na construção deste tipo de barreiras, é o teor em água de compactação utilizado nas misturas. Verificou-se, em vários casos, que os construtores foram obrigados a diminuir o teor em água inicialmente previsto, através dos ensaios laboratoriais, para facilitar a compactação do material.

Verificou-se que após a instalação, as misturas tiveram o desempenho requerido pelo tipo de obra. Mais uma vez, não foi encontrada informação sobre o aproveitamento de finos de pedreira neste tipo de obras geotécnicas.

## CAPÍTULO 2.

# PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram apresentados estudos realizados por vários autores sobre o comportamento hidráulico de vários tipos de solos, principalmente areia, misturados com bentonites, principalmente a sódica, em diferentes percentagens. Grande parte destes estudos visavam a obtenção de uma mistura solo-bentonite de permeabilidade muito baixa, tendo em vista a sua aplicação na construção de barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais, como é o caso, por exemplo, dos aterros de resíduos. O valor habitualmente requerido para a condutividade hidráulica das barreiras neste tipo de obras, é de grandeza inferior ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, no caso dos aterros de resíduos perigosos e não perigosos, e a  $1 \times 10^{-7}$  m/s, no caso dos aterros de resíduos inertes.

Neste capítulo apresenta-se o estudo da condutividade hidráulica dos finos de pedreiras de granito misturados com diferentes percentagens de bentonite, com o objectivo de avaliar o melhoramento da sua capacidade de confinamento hidráulico, comparativamente com os finos das mesmas pedreiras sem tratamento e a viabilidade técnica da sua reciclagem, utilizando-os na construção de barreiras de confinamento hidráulico.

Começa-se por descrever os materiais utilizados nas misturas, ou seja, os finos das pedreiras de granito de Moinho de Vento, em Famalicão (FML) e de Bouça do

Menino, em Cervães (CRV), exploradas pelo Grupo Mota-Engil, e uma bentonite sódica natural. Apresentam-se, em seguida, as propriedades índice e físicas das misturas finos-bentonite e comparam-se com as dos finos não tratados com a bentonite, de forma a observar a influência da adição de pequenas percentagens da bentonite (2%, 4% e 6%) nestas propriedades. O estudo da condutividade hidráulica das misturas foi efectuado sobre provetes compactados pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, com teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo, respectivamente,  $w_{opn-2\%}$  e  $w_{opm-2\%}$ . Por fim, recorrendo a um Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental, observou-se a microestrutura das misturas preparadas a partir dos finos de CRV com 6% de bentonite, antes e após a fase de percolação com água desmineralizada nos ensaios de permeabilidade, e a microestrutura dos finos de CRV sem adição de bentonite, após compactação pelos mesmos métodos.

As propriedades dos finos das pedreiras não tratados com bentonite foram estudadas no âmbito de outro trabalho em curso no LNEC, igualmente integrado no Protocolo LNEC-Grupo ME.

A utilização de pequenas percentagens de bentonite nas misturas ensaiadas, justifica-se pelo custo da bentonite, que deve ser optimizado para viabilizar a sua utilização, por a recolha bibliográfica evidenciar que a condutividade hidráulica dos solos, habitualmente, diminui para valores constantes com reduzidas quantidades de bentonite, e por aumentar a dificuldade de compactação das misturas *in situ* quando aumenta a percentagem em bentonite.

A preparação das misturas com teores em água  $w_{opn-2\%}$  e  $w_{opm-2\%}$  foi adoptada devido à maior dificuldade de compactação das misturas *in situ* quando aumenta o teor em água de compactação e, pelo facto de, sendo a condutividade hidráulica dos solos finos habitualmente maior no ramo seco do que no ramo húmido da curva de compactação, como observado com os finos das pedreiras, haver uma margem potencialmente maior para observar o melhoramento da capacidade de confinamento hidráulico dos finos misturados com a bentonite.

O Quadro 2.1 apresenta os ensaios realizados ao longo do programa experimental e as respectivas normas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental e no Laboratório de Caracterização de Geomateriais, do Departamento de Geotecnia do LNEC e no Centro de Materiais da Universidade do Porto.

Quadro 2.1 - Síntese do programa experimental utilizado na determinação das propriedades das misturas.

Propriedade				Norma	FML + % bentonite			CRV + % bentonite			
					2%	4%	6%	0%	2%	4%	6%
Índice	Granulometria			E 196 - 1966	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
	Limites de consistência			NP 143 - 1969	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Física	Qualidade dos finos			NF P 94 - 068	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Expansibilidade livre	Método LNEC		LNEC E 200 - 1967	✓	✓	✓		✓	✓	✓
		Método Holtz e Gibbs		(c)	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Compactação	Proctor normal		LNEC E 197	✓	✓	✓		✓	✓	✓
		Proctor modificado			✓	✓	✓		✓	✓	✓
Hidráulica/Outra	Condutividade hidráulica	Provete w <sub>opn-2%</sub> <sup>(a)</sup>		D 5856 - 95 (ASTM) e Proc. Interno LNEC	✓	✓	✓		✓	✓	✓
		Provete w <sub>opm-2%</sub> <sup>(a)</sup>			✓	✓	✓		✓	✓	✓
	pH e condutividade eléctrica da solução efluente			Várias	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Propriedades físicas dos provetes, antes e após a percolação			Várias	✓	✓	✓	x	✓	✓	
	Microscópio electrónico de varrimento ambiental <sup>(b)</sup>	Provete w <sub>opn-2%</sub>	Antes fase percolação	Proc. Interno CEMUP	x	x	x	✓	x	✓	
			Após fase percolação					x		✓	
		Provete w <sub>opm-2%</sub>	Antes fase percolação					✓		✓	
Após fase percolação			x					✓			

✓ Ensaios realizados.

x Ensaios não realizados.

(a) Teor em água de compactação do provete 2% inferior ao teor em água óptimo.

(b) Efectuado no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP).

(c) Procedimento de Holtz e Gibbs (1956).



## 2.2. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DAS MISTURAS

### 2.2.1. Finos das pedreiras

Os finos utilizados no programa experimental são provenientes de duas pedreiras de granito, situadas no norte do país: a Pedreira do Moinho de Vento, Famalicão (FML) (Figura 2.1 (a)), e a Pedreira da Bouça do Menino, Cervães (CRV) (Figura 2.1 (b)). Ambas produzem no seu conjunto cerca de 25.000 toneladas por ano (t/a) de finos (Roque *et al.*, 2008).

Como referido anteriormente, os finos resultam da produção de agregados e de areias nas duas pedreiras. Por não fazer parte dos objectivos desta dissertação, não se apresenta o processo de produção dos finos nas duas pedreiras, que pode ser consultado em Roque *et al.* (2008).



(a)



(b)

Figura 2.1 – (a) Finos da pedreira do Moinho de Vento, Famalicão (FML); (b) finos da pedreira de Bouça do Menino, Cervães (CRV).

#### 2.2.1.1. Enquadramento geológico regional e local das pedreiras

Tendo por base o trabalho publicado por Roque *et al.* (2008), apresenta-se resumidamente o enquadramento geológico regional e local das duas pedreiras.

A pedreira do Moinho de Vento pertence à freguesia da Portela, concelho de Vila Nova de Famalicão, distrito de Braga, e é abrangida pela Folha 84 (Selho, Guimarães) da Carta Militar de Portugal, à escala de 1:25.000, do Serviço Cartográfico do Exército. O mapa geológico que cobre a área em questão corresponde à folha 9-B (Guimarães) da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50.000, do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, LNEG (antigos Serviços Geológicos de Portugal, SGP). Na área de implementação da pedreira afloram rochas graníticas, pertencentes aos *Granitos de Airão, Aves e Roriz* ( $\gamma m_1$ ) das fases tardi a pós-tectónicas da Orogenia Hercínica. Trata-se de monzogranitos (granitos calco-alcalinos) de grão médio, de tendência porfiróide, de duas micas, com o predomínio de Biotite. Localmente, verifica-se que o grau de alteração da rocha é variável, coexistindo afloramentos de saibros graníticos (espessura máxima da ordem dos 4 a 5 m) com granitos sãos.

A pedreira da Bouça do Menino pertence à freguesia de Cervães, concelho de Vila Verde, distrito de Braga, e está representada na Folha 55 (Carapeços, Barcelos) da Carta Militar de Portugal, à escala de 1:25.000, do Serviço Cartográfico do Exército. Do ponto de vista geológico-geotécnico, pertence à folha 5-C (Barcelos), na escala 1:50.000, da Carta Geológica de Portugal, do LNEG (antigos SGP). Os terrenos aflorantes, de idade provavelmente hercínica, pertencem, na sua quase totalidade, ao *Granito calco-alcalino, de duas micas, predominantemente biotítico*, o qual pode apresentar variações quer devido à sua textura quer à sua composição. De acordo com o reconhecimento geológico realizado no local, o grau de alteração da rocha é variável, coexistindo afloramentos graníticos muito alterados (espessura máxima da ordem dos 15 m) a sãos.

#### **2.2.1.2. Amostragem e preparação das amostras**

A descrição da amostragem dos finos nas duas pedreiras utilizados neste estudo, bem como da preparação das respectivas amostras em laboratório, está descrita em detalhe em Frias *et al.* (2008). Em síntese, refere-se apenas que os finos foram

inicialmente secos ao ar, e, em seguida, desagregados com maços de borracha. Após a desagregação, foram peneirados, homogeneizados e acondicionados em sacos.

### **2.2.1.3. Propriedades dos finos**

Para que os finos possam ser reciclados como material de construção em obras geotécnicas, é necessário evidenciar que se tratam de resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, por se entender que neste caso o seu potencial poluente é baixo e não coloca em risco o meio ambiente e a saúde pública. Os resultados da caracterização ambiental efectuada por Frias *et al.* (2008), de acordo com os critérios de admissão de resíduos em aterro previstos, à data da realização do estudo, na legislação portuguesa em vigor (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto) e comunitária (Decisão do Conselho 2003/33/CE, de 19 de Dezembro de 2002), mostraram que os finos das pedreiras pertencem à classe dos resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, pelo que, do ponto de vista ambiental, é viável a sua reciclagem em obras geotécnicas.

Nesta secção apresenta-se uma síntese das propriedades geotécnicas dos finos das duas pedreiras, tendo

Nos Quadros 2.2 a 2.5 mostram-se, respectivamente, a composição mineralógica semiquantitativa da fracção global e da fracção argilosa ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ) dos finos e as suas propriedades índice, físicas e hidráulicas. Os resultados apresentados foram obtidos no âmbito de um outro trabalho em curso, integrado no Protocolo LNEC-Grupo ME. Estas propriedades serão oportunamente utilizadas na comparação com os resultados obtidos para as mesmas propriedades nas misturas dos finos das pedreiras com a bentonite.

Quadro 2.2 - Análise mineralógica semiquantitativa das amostras globais e da fracção argilosa ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ) dos finos das pedreiras (LNEC, a publicar).

Minerais cristalinos identificados		FML	CRV
Fracção global	Quartzo (%)	52	55
	Feldspatos (%)	33	40
	Maghemite (%)	4	2
	Hematite (%)	1	0
	Filossilicatos (%)	10	3
Fracção $\leq 2 \mu\text{m}$	Quartzo (%)	10	20
	Feldspatos (%)	7	11
	Caulinite (%)	4	16
	Micas (%)	17	32
	Esmectite (%)	62	21

Quadro 2.3 - Propriedades índice dos finos das pedreiras (adaptado de Frias *et al.*, 2008).

Propriedades			FML	CRV
Composição granulométrica	Areia (2 mm – 0,06 mm) (%)		18	49
	Silte (0,06 mm – 0,002 mm) (%)		67	46
	Argila ( $\leq 0,002$ mm) (%)		15	5
Limites de consistência		w <sub>L</sub> (%)	39	N.P.
		w <sub>P</sub> (%)	27	N.P.
		I <sub>P</sub> (%)	13	N.P.
Classificação Triangular			Silte-Arenoso	Areia-Siltosa
Classificação USCS			ML - Siltes Inorgânicos	
Classificação AASHTO			A-6 Solos Argilosos	A-4 Solos Siltosos

N.P. Não plástico

Quadro 2.4 - Propriedades físicas dos finos das pedreiras (adaptado de Frias *et al.*, 2008).

Propriedades			FML	CRV
Qualidade dos finos	VBS (g/100g)		2,83	0,37
Expansibilidade livre	Método LNEC	E (%)	12	7
	Método Holtz e Gibbs <sup>(a)</sup>	I <sub>g</sub> (%)	30	40
		Potencial de expansibilidade	fraco	fraco
Compactação	Proctor normal	γ <sub>dmax</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	15,4	13,3
		w <sub>opn</sub> (%)	19,9	17,9
	Proctor modificado	γ <sub>dmax</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	17,3	17,2
		w <sub>opm</sub> (%)	15,0	13,6

(a) adaptado de LNEC (a publicar)

Quadro 2.5 – Condutividade hidráulica dos finos das pedreiras, compactados pelos métodos Proctor normal (PN) e modificado (PM) (adaptado de Frias *et al.*, 2008).

Propriedades		FML	CRV
PN	$w_{\text{opt-2\%}}$ (%)	17,9	15,9
	Tempo, t (dias)	51	40
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$1,7 \times 10^{-8}$	$18 \times 10^{-8}$
	pH <sup>(a)</sup>	7,59	5,91
	CE (mS/cm) <sup>(a)</sup>	0,33	0,16
PM	$w_{\text{opt-2\%}}$	13,0	11,6
	Tempo, t (dias)	51	35
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$2,6 \times 10^{-8}$	$5,7 \times 10^{-8}$
	pH <sup>(a)</sup>	8,5	6,4
	CE (mS/cm) <sup>(a)</sup>	0,85	0,22

(a) adaptado de LNEC (a publicar)

### 2.2.2. Bentonite sódica

Na mistura solo-bentonite utilizou-se uma bentonite sódica natural, comercial, da marca “Pilogel”, proveniente de Madrás e Bujarat, na Índia. Esta bentonite é fornecida pela firma A. Agostinho, Químicos e Minerais Unipessoal, Lda.

Trata-se de uma bentonite em forma de pó, por ser a mais utilizada na construção de barreiras de confinamento hidráulico e por a sua finura revestir melhor as partículas do solo (Chapuis *et al.*, 2006).

A bentonite apresenta cor acastanhada de tom médio, como ilustra a Figura 2.2.



Figura 2.2 - Bentonite sódica natural utilizada nos ensaios.

De seguida, é apresentada (Quadro 2.6) informação relativa a esta bentonite sódica.

Quadro 2.6 - Características da bentonite sódica (adaptado de LNEC, 2007).

Propriedade	Norma	Resultado	
Diâmetro das partículas	x	0,3µm a 200µm	
Massa volúmica das partículas	LNEC E 64 - 1979	2,67 g/cm <sup>3</sup>	
Composição mineralógica	x	90% de esmectite	
Perda ao rubro	x	8%	
Matéria orgânica	x	1,1%	
Ensaio de pH / Potencial redox (Eh)	x	pH = 10,29 Eh = -211 mV	
Limites de consistência	LNEC NP 143 - 1969	w <sub>L</sub> = 500% w <sub>P</sub> = 62% I <sub>P</sub> = 438%	
	BS 1377:Part2:1990	w <sub>L</sub> = 492% w <sub>P</sub> = 62% I <sub>P</sub> = 430%	
Expansibilidade LNEC	LNEC E 200 - 1967	164%	
Superfície específica externa (Método BET)	x	30,2 m <sup>2</sup> /g	
Superfície específica total	NF P 94 - 068	816,0 m <sup>2</sup> /g	
Capacidade de troca catiónica pelo acetato de amónio	x	63,66 meq/100g	
Composição química	x	Catão	ppm
		Si	6,83
		Ca	67,39
		Al	5,18
		K	0,03
		Mg	40,61
		Na	<0,01

x - Procedimento interno do LNEC.



### 2.2.3. Preparação das amostras das misturas

A preparação das misturas utilizadas na realização dos ensaios envolveu os seguintes passos:

- 1) secagem dos finos das pedreiras na estufa, a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ , durante pelo menos 48 horas;
- 2) adição da bentonite aos finos na percentagem pretendida (2%, 4% e 6%, em relação ao peso dos finos secos);
- 3) mistura manual dos dois materiais até obtenção de uma massa homogênea.

Após a mistura dos finos com as várias percentagens de bentonite, o material era armazenado até à realização dos ensaios indicados no Quadro 2.1.

## 2.3. PROPRIEDADES ÍNDICE DAS MISTURAS

As propriedades índice das misturas finos-bentonite foram determinadas a partir dos ensaios de análise granulométrica e dos limites de consistência, habitualmente utilizados nos solos.

Com base nos resultados obtidos para estas propriedades procedeu-se à Classificação Triangular para Solos da especificação LNEC E 219, a Classificação Unificada dos Solos (USCS) da *American Society for Testing and Materials* (ASTM D 2487), e a Classificação para Fins Rodoviários da especificação LNEC E 240, baseada na classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

### 2.3.1. Composição granulométrica

A análise granulométrica das misturas finos-bentonite foi efectuada recorrendo ao método clássico, segundo a especificação LNEC E 196 – 1966.

O Quadro 2.7 apresenta os valores obtidos na análise granulométrica das misturas finos-bentonite e as Figuras 2.3 e 2.4, as curvas granulométricas respectivas. Nas mesmas figuras também se apresentam as curvas granulométricas dos finos das pedreiras sem adição de bentonite, para posterior comparação (secção 2.3.4.) com as curvas granulométricas das misturas.

Quadro 2.7 - Composição granulométrica das misturas de FML e CRV com bentonite.

Composição granulométrica	FML + % bentonite			CRV + % bentonite		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%
Areia (2 mm – 0,06 mm) (%)	21	24	22	50	50	50
Silte (0,06 mm – 0,002 mm) (%)	59	58	59	43	40	39
Argila ( $\leq 0,002$ mm) (%)	20	18	19	7	10	11

Tendo por base os resultados obtidos na análise granulométrica verifica-se que o aumento da percentagem de bentonite nas misturas de 2% para 6%, não produziu alterações significativas nas suas composições granulométricas, nem se pode concluir sobre qualquer tendência face aos resultados obtidos. Com efeito, se na mistura com os finos de FML a percentagem de fracção argilosa diminuiu ligeiramente com o aumento da percentagem de bentonite, na mistura com os finos de CRV aumentou com o aumento da percentagem de bentonite. Na secção 2.3.4., onde se compara a composição granulométrica das misturas com a dos finos, apresenta-se uma análise detalhada dos resultados.

### 2.3.2. Limites de consistência

Os limites de consistência foram efectuados segundo a NP 143 – 1969.

No Quadro 2.8 apresentam-se os valores obtidos para ambas as misturas.

Quadro 2.8 - Limites de consistência das misturas de FML e CRV com bentonite.

Limites de consistência		FML + %bentonite			CRV + %bentonite		
		2%	4%	6%	2%	4%	6%
Limite de liquidez	$w_L(\%)$	45	46	49	N.P.	29	31
Limite de plasticidade	$w_P(\%)$	27	28	27	N.P.	N.P.	N.P.
Índice de plasticidade	$I_P(\%)$	17	18	22	N.P.	N.P.	N.P.

N.P. - Não plástico.

Os resultados obtidos mostram que o aumento da percentagem de bentonite nas misturas não alterou significativamente os valores dos limites de consistência, com excepção do limite de liquidez,  $w_L$ , das misturas dos finos de CRV com 4% e 6% de bentonite, que passam de não plásticas para 29 e 31%, respectivamente.

Na secção 2.3.4., analisa-se a influência da adição da bentonite na plasticidade dos finos das pedreiras, comparando-se os limites de consistência das misturas com os dos finos.

### 2.3.3. Classificação geotécnica das misturas

Conhecidas as propriedades índice das misturas, procedeu-se à Classificação triangular, à Classificação USCS e à Classificação AASHTO das mesmas.

O Quadro 2.9 apresenta as três classificações para as misturas de FML e CRV com as três percentagens de bentonite.

# Finos da pedra de FML

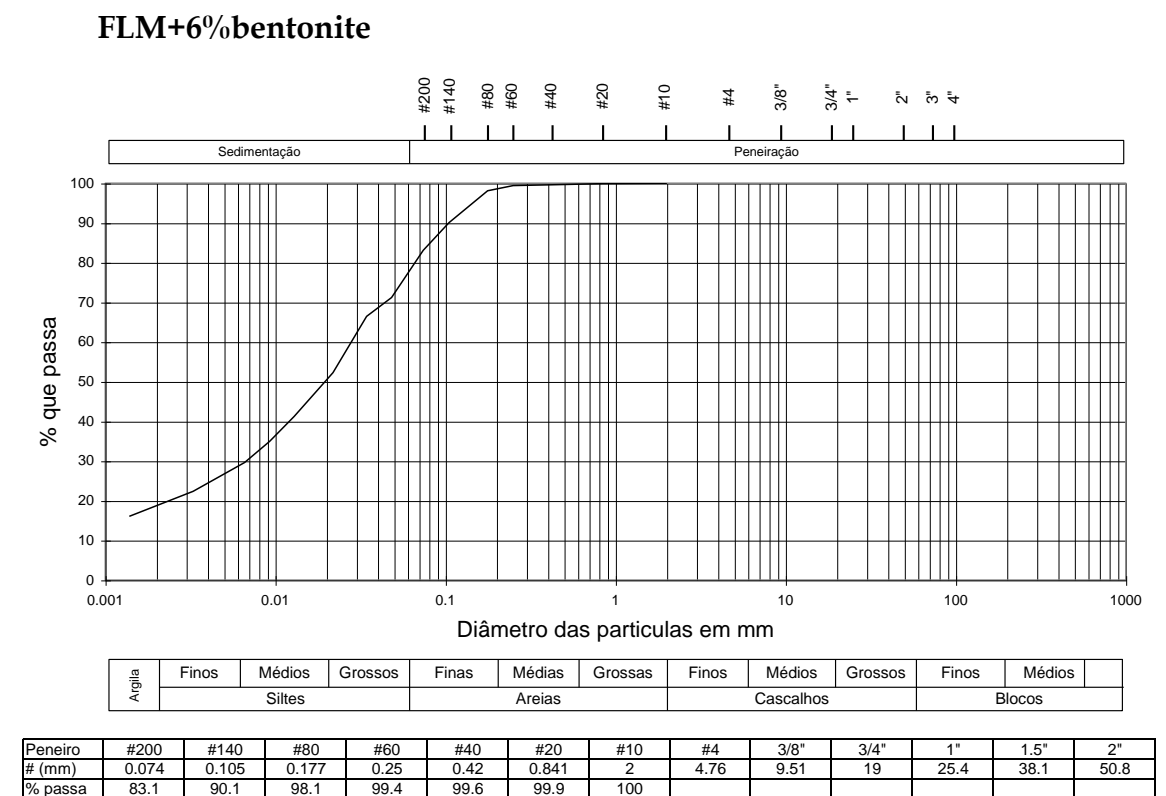
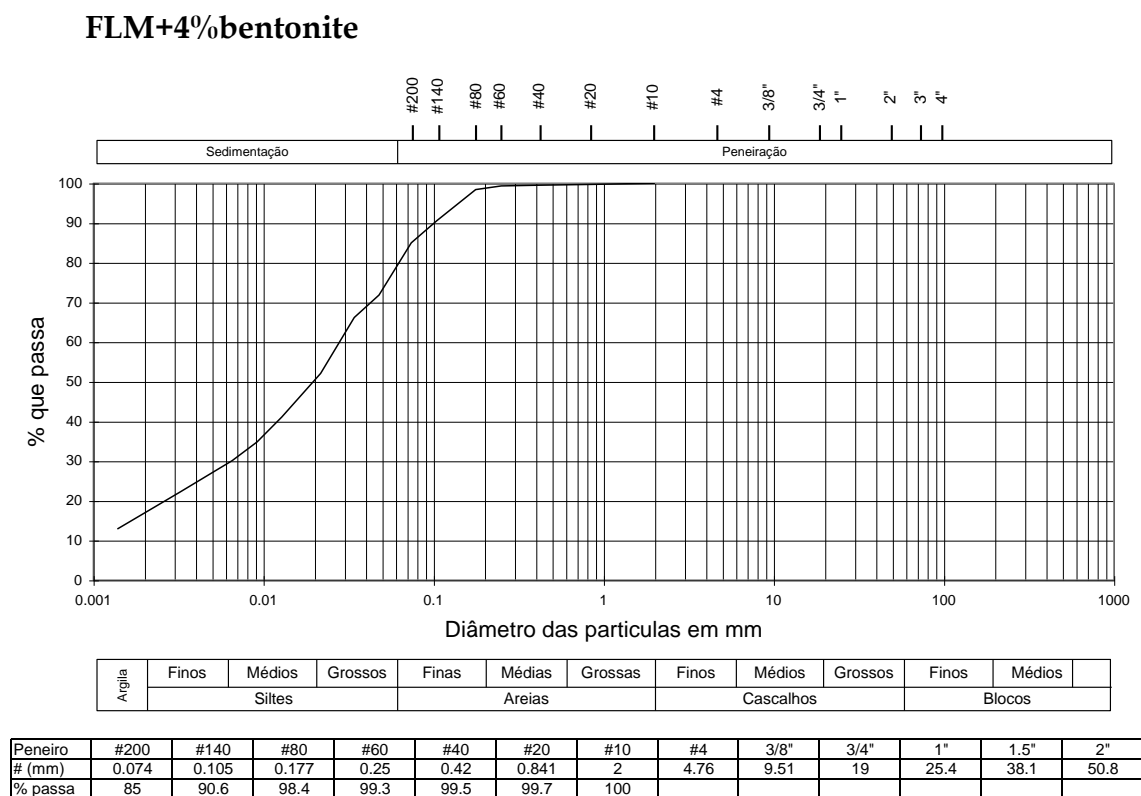
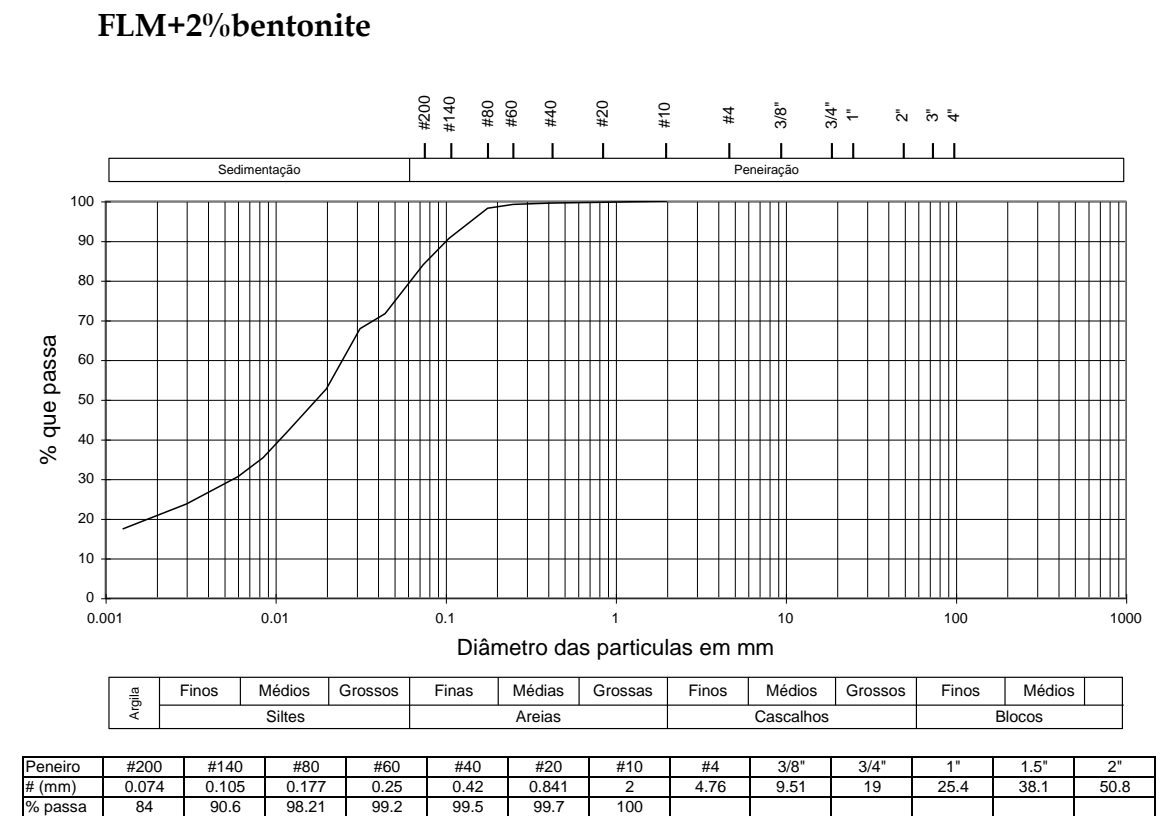
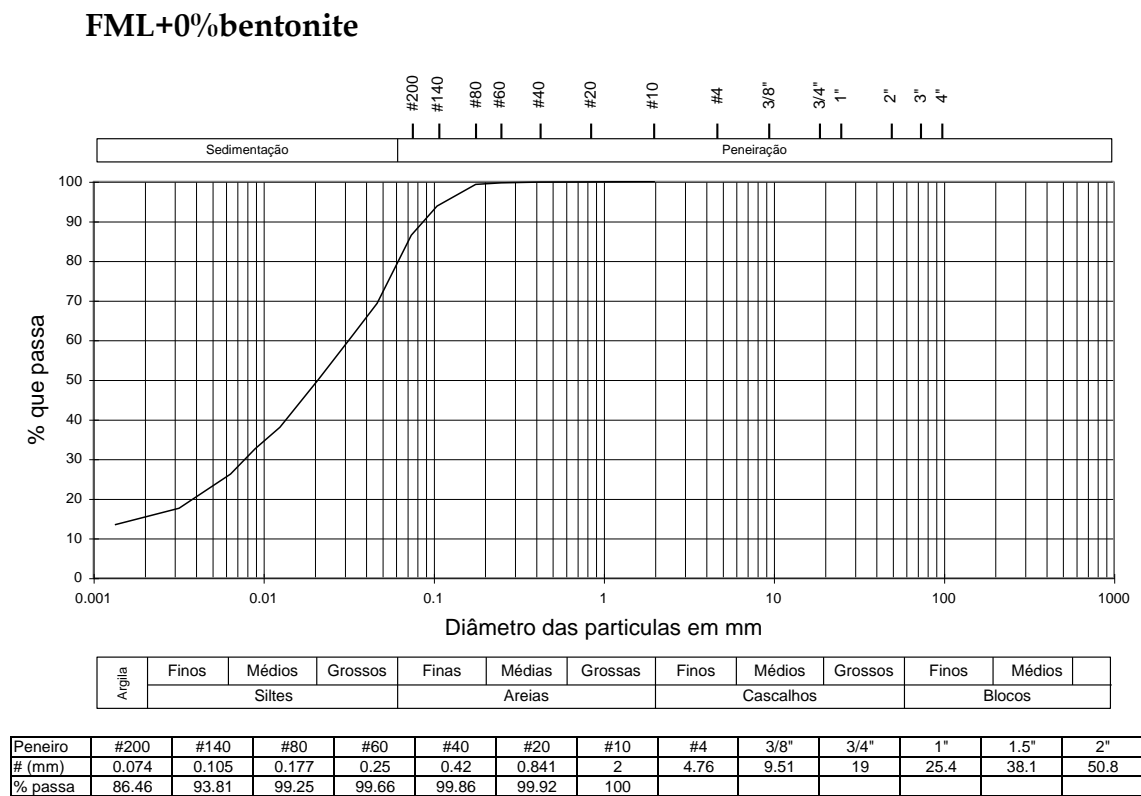


Figura 2.3 - Curvas granulométricas dos finos da pedra de FML, sem e com bentonite.



# Finos da pedreira de CRV

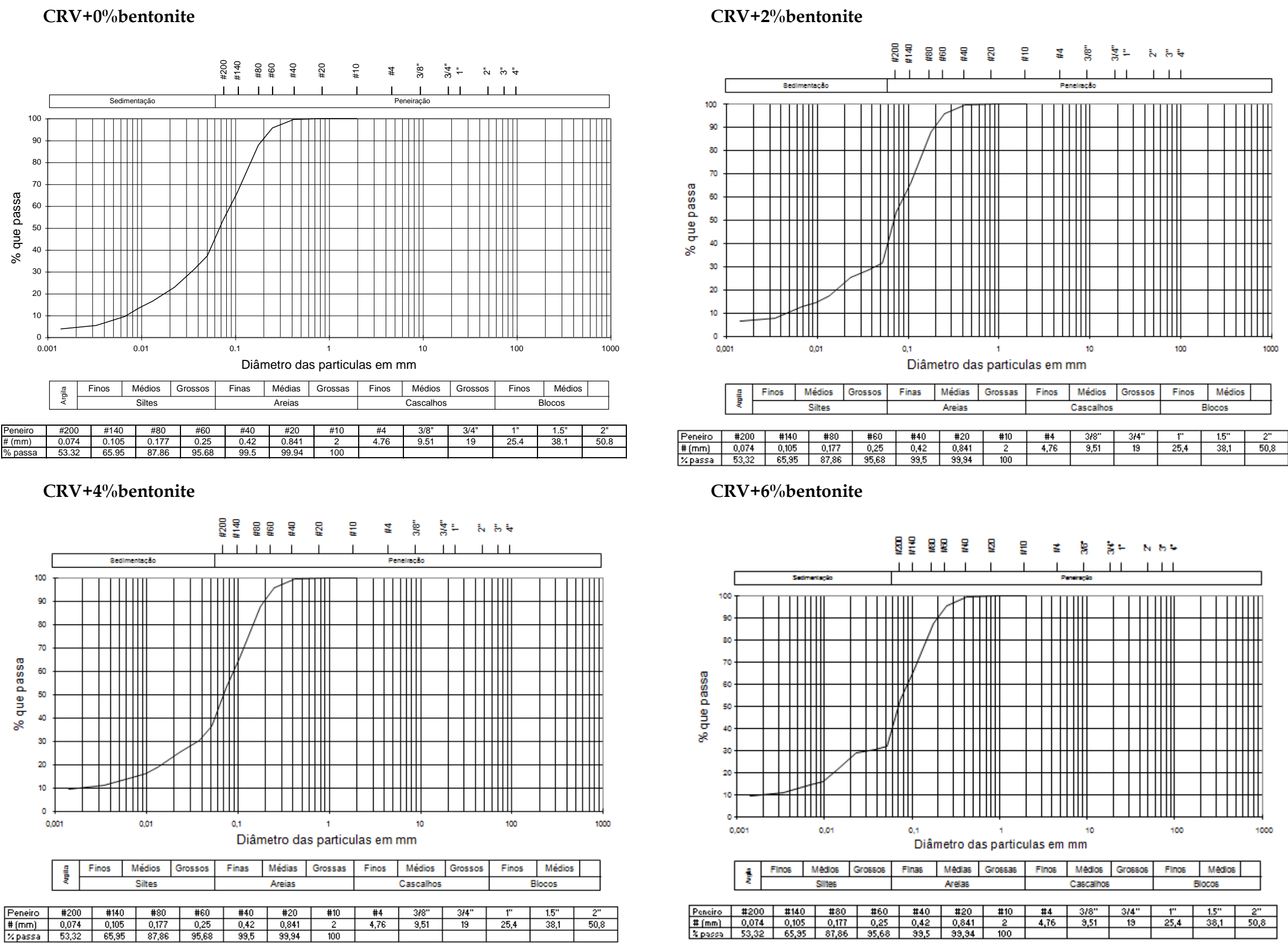


Figura 2.4 - Curvas granulométricas dos finos da pedreira de CRV, sem e com bentonite.



Segundo a classificação triangular para solos da especificação LNEC E 219, as misturas dos finos de FML e de CRV com a bentonite correspondem a materiais silto-arenosos e areno-siltosos, respectivamente, com excepção da mistura dos finos de FML com 2% de bentonite, que é classificada como silte-argiloso.

A Classificação Unificada dos Solos atribui às misturas de FML e de CRV com bentonite à categoria ML, que corresponde a Siltes Inorgânicos.

Pela Classificação para Fins Rodoviários, as misturas de FML com bentonite correspondem à categoria A-7-5, Solos Argilosos, enquanto as misturas de CRV com bentonite correspondem à categoria A-4, Solos Siltosos.

Quadro 2.9 - Classificação geotécnica das misturas de FML e de CRV com bentonite.

Classificação geotécnica	FML + %bentonite			CRV + %bentonite		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%
Classificação Triangular	Silte-Argiloso	Silte-Arenoso		Areia-Siltosa		
Classificação USCS	ML					
	Siltes Inorgânicos					
Classificação AASHTO	A-7-5			A-4		
	Solos Argilosos			Solos Siltosos		

#### 2.3.4. Análise comparativa das propriedades índice das misturas e dos finos das pedreiras

Com o intuito de avaliar a influência da adição da bentonite aos finos das pedreiras, comparam-se as propriedades índice dos finos apresentadas no Quadro 2.3 com as propriedades índice das misturas apresentadas no Quadro 2.7.

De forma a facilitar a comparação entre as curvas granulométricas dos finos de FML e de CRV, sem adição de bentonite, com as curvas granulométricas das misturas



destes finos com 2, 4 e 6% de bentonite, apresentam-se na Figura 2.3 e na Figura 2.4, respectivamente, as curvas respectivas.

Comparando os valores da composição granulométrica apresentados nos quadros e as curvas representadas nas figuras, ambos acima referidos, verifica-se que, dos finos para as misturas, houve um aumento da percentagem da fracção arenosa e da fracção argilosa e uma diminuição da fracção siltosa. Se o aumento da percentagem da fracção argilosa com a adição da bentonite era expectável, já o mesmo não se poderá dizer em relação ao aumento da percentagem da fracção arenosa.

Uma das explicações possíveis para o aumento da percentagem da fracção arenosa é a utilização de tomas recolhidas nas amostras de FML e de CRV que não sejam exactamente iguais, em resultado de eventuais deficiências associadas às operações de homogeneização e de quarteamento dos finos.

Uma segunda explicação para o aumento da percentagem da fracção arenosa é a formação de agregados constituídos de partículas de bentonite e finos da pedreira, ainda que exista a adição de desfloculante na realização do ensaio. A confirmar-se a hipótese formulada, concluiu-se que a quantidade de desfloculante adicionada, em acordo com o recomendado pela norma, não foi a suficiente para evitar a formação dos agregados.

A Figura 2.5 permite observar a influência da adição da bentonite nos limites de consistência dos finos das pedreiras (nos casos em que o comportamento dos materiais era não plástico, adoptou-se o valor nulo).

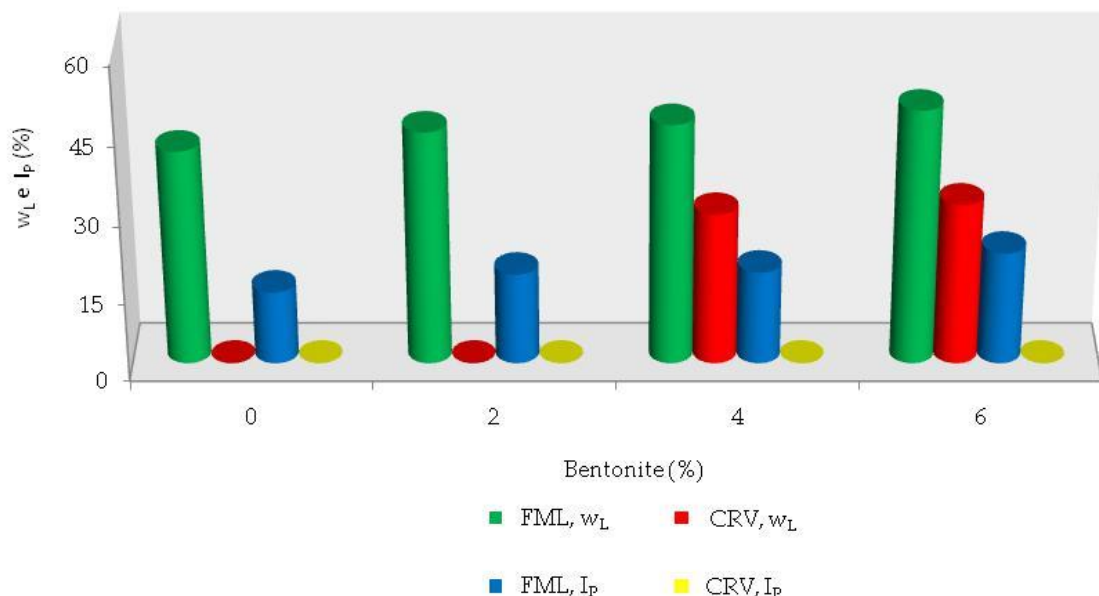


Figura 2.5 - Relação entre a porcentagem de bentonite e o limite de liquidez ( $w_L$ ) e entre a porcentagem de bentonite e o índice de plasticidade ( $I_p$ ) das misturas finos-bentonite e dos finos das pedreiras.

Conforme referido oportunamente, os resultados obtidos para os limites de consistência mostram, que o aumento da porcentagem de bentonite nas misturas não alterou significativamente os valores dos limites de consistência. Comparativamente com os limites de consistência dos finos de FML e de CRV, apresentados no Quadro 2.3, observa-se que as misturas dos finos de CRV com a bentonite continuam a ser não plásticas, enquanto o índice de plasticidade,  $I_p$ , das misturas dos finos de FML com 2% e 4% de bentonite aumentou cerca de 1,3 vezes e com 6%, cerca de 1,5 vezes.

Pela Classificação Triangular, a adição de bentonite não alterou a categoria em que se inseriam os finos de FML e de CRV, respectivamente, materiais silto-arenosos e areno-siltosos. A exceção é a mistura dos finos de FML com 2% de bentonite, que passou para a categoria de materiais silto-argilosos.

Na Classificação Unificada de Solos não se verificou nenhuma alteração, continuando, tanto os finos como as misturas dos finos com bentonite, de ambas as pedreiras, a pertencerem à categoria ML, ou seja, Siltes Inorgânicos.

Na Classificação para Fins Rodoviários foi onde se verificou uma maior diferença. Os finos de FML foram classificados como A-6, Solos Argilosos, enquanto as misturas destes finos com as três percentagens de bentonite foram classificadas como A-7-5, Solos Argilosos. Tanto para os finos de CRV como para as misturas destes finos com as três percentagens de bentonite, não foram observadas modificações, sendo ambos classificados como A-4, Solos Siltosos.

## **2.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DAS MISTURAS**

### **2.4.1. Qualidade dos finos (ensaio do azul de metileno)**

A determinação da qualidade dos finos foi realizada pela norma NF P 94 – 068.

O ensaio do azul de metileno é frequentemente utilizado para determinar o conteúdo em bentonite presente numa mistura solo-bentonite (Kenney *et al.*, 1992). Hassanein *et al.* (1996) referem que apesar do ensaio do azul de metileno ser muito utilizado, apresenta alguns inconvenientes, designadamente:

- 1) demorar cerca de 30 minutos, que pode limitar o número de ensaios a realizar;
- 2) ser subjectiva a avaliação da titulação;
- 3) ser geralmente realizado com amostras de pequena quantidade (5 a 50 g);
- 4) ser pouco preciso, que aumenta com a diminuição do conteúdo em bentonite (Alther, 1983);
- 5) ser o resultado influenciado por outros factores, além do conteúdo em bentonite, como por exemplo, a quantidade e o tipo de argilas e siltes no solo da mistura.

Os valores do azul de metileno (VBS) obtidos nas misturas ensaiadas são apresentados no Quadro 2.10.

Quadro 2.10- Valores do azul de metileno das misturas de FML e CRV com bentonite.

Parâmetro	FML + %bentonite			CRV + %bentonite		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%
<b>VBS (g/100g)</b>	3,37	3,71	4,37	1,25	1,95	2,90

É observável em cada conjunto das misturas ensaiadas, um aumento gradual no valor de VBS à medida que aumenta a percentagem de bentonite. É, no entanto, de salientar que o aumento do valor de VBS com o aumento da percentagem de bentonite é menor nas misturas com os finos de FML do que nas misturas com os finos de CRV.

Verifica-se igualmente que para a mesma percentagem de bentonite nas misturas de FML e de CRV, os valores de VBS são cerca de duas vezes maiores nas misturas de FML do que nas misturas de CRV. Estes resultados são coerentes com a composição granulométrica e com a natureza dos minerais argilosos dos finos de FML e de CRV.

Na secção 2.4.4., analisa-se a influência da adição da bentonite no valor de VBS dos finos das pedreiras, comparando-se os valores de VBS das misturas com os dos finos.

## 2.4.2. Expansibilidade livre

A expansibilidade livre foi determinada recorrendo a dois métodos diferentes: especificação LNEC E 200 - 1967 e procedimento de Holtz e Gibbs (1956), citado por Roque (2001).

O procedimento de Holtz e Gibbs recomenda as principais operações seguintes:

- 1) secagem do solo na estufa durante 24 horas, a  $110 \pm 5$  °C;
- 2) desagregação do solo e peneiração no crivo N.º 40 (0,425 mm);
- 3) colocação de 10 cm<sup>3</sup> do material passado no crivo N.º 40, numa proveta graduada de 100 cm<sup>3</sup>;
- 4) adição de 100 cm<sup>3</sup> de água à proveta graduada e agitação manual durante aproximadamente três minutos, de modo a homogeneizar a mistura solo/água e a colocar o solo em suspensão;
- 5) leitura do volume final do solo ao fim de 24 horas.

O Índice de Expansibilidade Livre,  $I_g$ , é determinado segundo a seguinte fórmula:

$$I_g = 100 \frac{V_f - V_i}{V_i} \quad (1)$$

onde  $V_i$  é o volume inicial do solo seco e  $V_f$  é o volume do solo no final do ensaio.

Holtz e Gibbs (1956, citados por Roque, 2001) classificaram o potencial de expansibilidade dos solos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} I_g < 50\% & \quad - \quad \text{potencial de expansibilidade fraco;} \\ 50\% \leq I_g < 100\% & \quad - \quad \text{potencial de expansibilidade médio;} \\ I_g \geq 100\% & \quad - \quad \text{potencial de expansibilidade elevado.} \end{aligned}$$

O Quadro 2.11 apresenta os valores obtidos para a expansibilidade livre das misturas, pelos métodos LNEC e Holtz e Gibbs.

Quadro 2.11 - Expansibilidade livre das misturas de FML e CRV com bentonite.

Expansibilidade livre		FML + %bentonite			CRV + %bentonite		
		2%	4%	6%	2%	4%	6%
<b>Método LNEC</b>	<b>E (%)</b>	16	19	22	15	17	20
<b>Método Holtz e Gibbs</b>	<b>V<sub>f</sub> (cm³)</b>	12,5	12	14	15	17,5	23
	<b>I<sub>g</sub> (%)</b>	25	20	40	50	75	130
	<b>Potencial de expansibilidade</b>	fraco	fraco	fraco	médio	médio	elevado

Os valores obtidos, em qualquer um dos métodos utilizados, permitem afirmar que a expansibilidade livre das misturas aumentou com o aumento da percentagem em bentonite.

Tendo em conta a composição granulométrica e a natureza dos minerais argilosos nos finos de FML e de CRV, previa-se que a expansibilidade das misturas com FML fosse superior à das misturas com CRV. No entanto, como evidencia o Quadro 2.11, não foi o que se verificou; a expansibilidade das misturas FML+bentonite é inferior à das misturas CRV+bentonite, e para ambos os métodos de ensaio utilizados.

Segundo a classificação de Holtz e Gibbs, o potencial de expansibilidade das misturas de FML é fraco e o das misturas de CVR é médio, com 2% e 4% de bentonite e elevado com 6% de bentonite.

Na secção 2.4.4., analisa-se a influência da adição da bentonite na expansibilidade livre dos finos das pedreiras, comparando-se a expansibilidade livre das misturas com a dos finos.

### 2.4.3. Compactação

A Figura 2.6 e a Figura 2.7 apresentam as curvas de compactação das misturas dos finos de FML e de CRV com as três percentagens de bentonite, respectivamente, obtidas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado da especificação LNEC E<sup>o</sup> - 197.

Como ponto de partida para a construção das curvas de compactação mostradas, foram consideradas as curvas definidas por Frias *et al.* (2008) para os finos das duas pedreiras.

O Quadro 2.12 apresenta os valores obtidos para o peso volúmico seco máximo,  $\gamma_{dmax}$ , e para os teores em água óptimo Proctor normal,  $w_{opn}$ , e Proctor modificado,  $w_{opm}$ , das misturas finos-bentonite, pelos métodos acima mencionados.

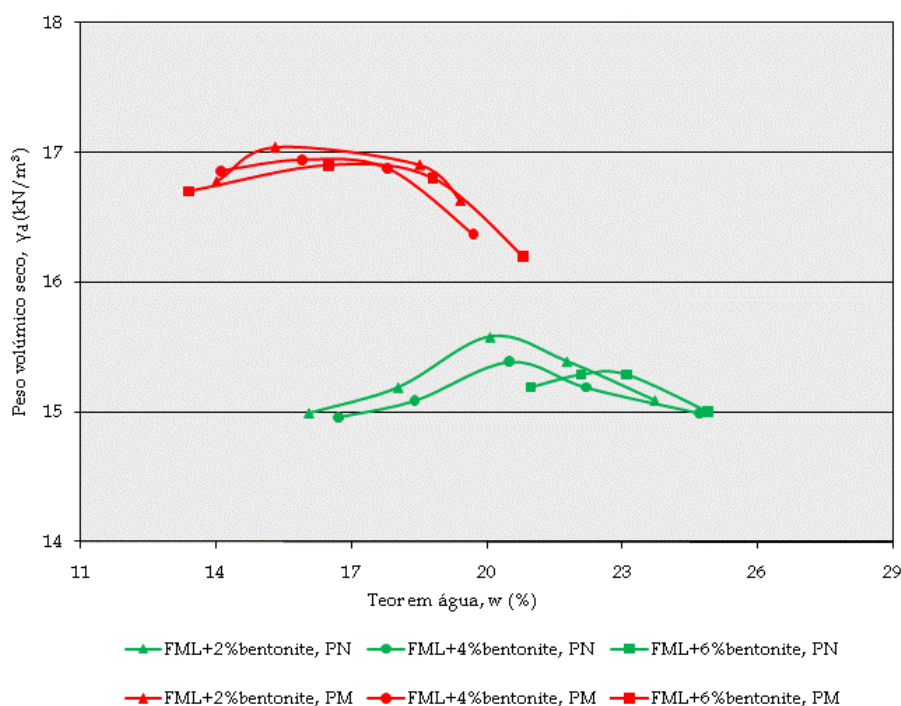


Figura 2.6 - Curvas de compactação dos finos FML+%bentonite, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).

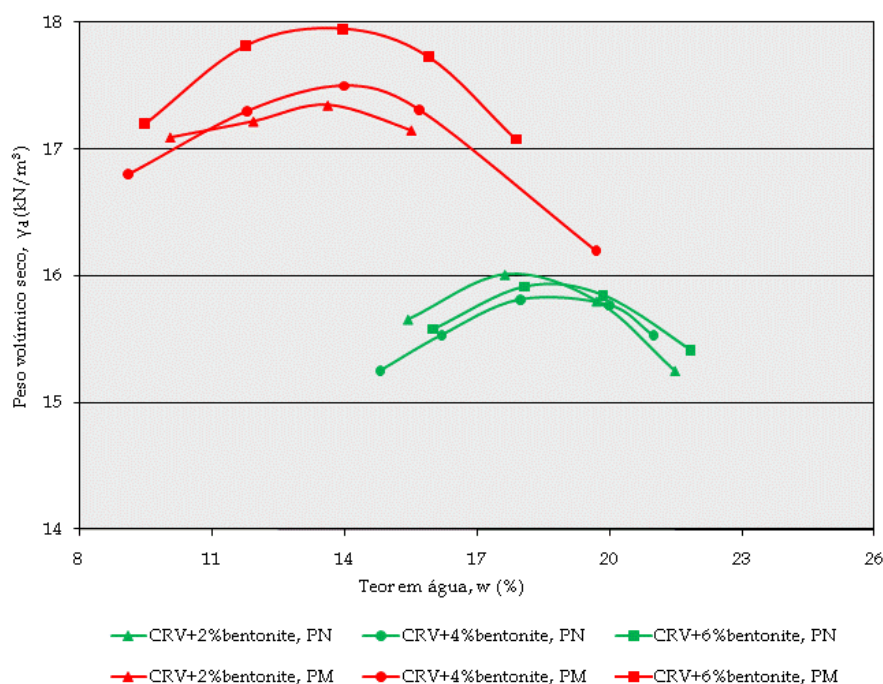


Figura 2.7 - Curvas de compactação dos finos CRV+%bentonite, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).

Quadro 2.12 - Peso volúmico seco máximo e teor em água ótimo das misturas de FML e CRV com bentonite, obtidos pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado.

Parâmetro		FML + %bentonite			CRV + %bentonite		
		2%	4%	6%	2%	4%	6%
Proctor normal	$\gamma_{dmax}$ (kN/m³)	15,6	15,4	15,3	16	15,9	15,9
	$w_{opn}$ (%)	20,2	20,5	22,6	17,8	18,8	18,6
Proctor modificado	$\gamma_{dmax}$ (kN/m³)	17,1	17,0	16,9	17,3	17,5	18,0
	$w_{opm}$ (%)	16,6	16,5	16,9	13,8	13,8	13,6

Como é possível observar pelo Quadro 2.12, o peso volúmico seco máximo das misturas praticamente não variou com o aumento da percentagem de bentonite. Apenas de assinalar, o aumento do peso volúmico seco máximo das misturas de CRV com o aumento da percentagem de bentonite na compactação pelo método Proctor modificado, que é o contrário do observado nos restantes casos, que seguem a



tendência esperada. Relativamente ao teor em água ótimo Proctor normal,  $w_{opn}$ , as alterações mais importantes ocorreram quando a percentagem de bentonite aumentou de 4% para 6%, nas misturas com os finos de FML e de 2% para 4%, nas misturas com os finos de CRV. No caso do teor em água ótimo Proctor modificado,  $w_{opm}$ , não existem diferenças significativas entre os valores obtidos para cada uma das misturas, à medida que a percentagem em bentonite aumentou. Alguns valores obtidos para o teor em água ótimo são aparentemente anómalos, se se considerar que a um aumento da percentagem em bentonite deveria corresponder um aumento no teor em água ótimo, o que não se verificou nos três casos seguintes: a) o valor de  $w_{opm}$  foi menor em FML+4%bentonite do que em FML+2%bentonite; b) o valor de  $w_{opn}$  foi menor em CRV+6%bentonite do que em CRV+4%bentonite; e c) o valor de  $w_{opm}$  foi menor em CRV+6%bentonite do que em CRV+4%bentonite.

Na secção seguinte, analisa-se a influência da adição da bentonite no peso volúmico seco e no teor em água de compactação dos finos das pedreiras, comparando-se os valores obtidos para estes parâmetros nas misturas e nos finos.

#### **2.4.4. Análise comparativa das propriedades físicas das misturas e dos finos das pedreiras**

Nesta secção comparam-se as propriedades físicas das misturas finos-bentonite estudadas, com as dos finos das pedreiras, no intuito de observar se a adição da bentonite, em diferentes percentagens, influencia as propriedades dos finos.

De modo a proporcionar uma melhor visualização das propriedades físicas das misturas e dos finos das pedreiras e facilitar a comparação entre estas, procedeu-se à sua representação gráfica nas Figuras 2.8 a 2.11.

Na Figura 2.8 comparam-se os valores do azul do metileno das misturas finos-bentonite com os valores do azul de metileno dos finos das pedreiras. Os finos sem bentonite estão representados no gráfico pelo valor de zero percentagem.

Ao comparar os valores de VBS obtidos para os finos de FML e de CRV com as misturas respectivas, observa-se que para a mesma percentagem de bentonite adicionada, o aumento do valor de VBS foi proporcionalmente mais elevado nos finos de CVR do que nos finos de FML. Por exemplo, a adição de 2% de bentonite aos finos de FML foi responsável por um aumento do valor de VBS de cerca de 1,2 vezes e aos finos de CRV de cerca de 3,4 vezes. Na secção 2.4.1 foi oportunamente observado, que há, proporcionalmente, um maior aumento do valor de VBS nas misturas de CRV do que nas misturas de FML, para um mesmo aumento da percentagem de bentonite.

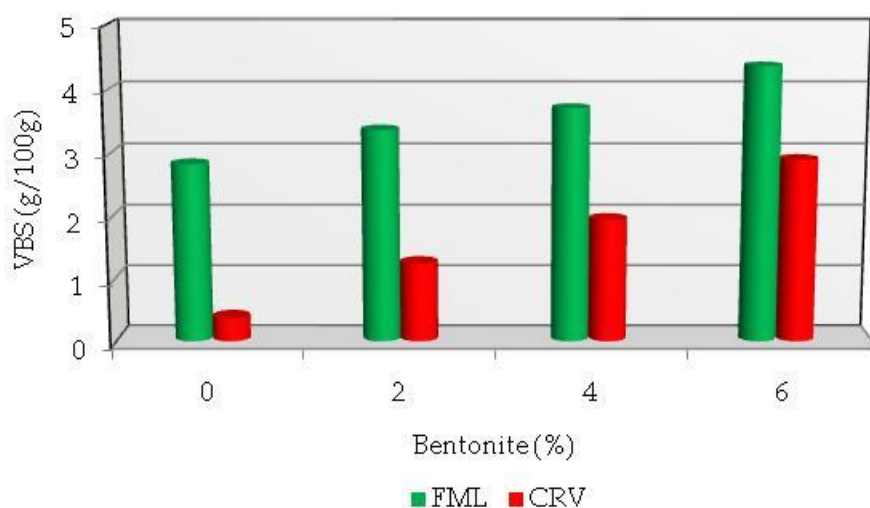


Figura 2.8 - Comparação dos valores do azul de metileno das misturas finos-bentonite com os valores do azul de metileno dos finos das pedreiras.

Para estudar a influência da bentonite na expansibilidade dos finos das pedreiras, projectaram-se na Figura 2.9 os valores da expansibilidade dos finos das pedreiras, com e sem bentonite. Verifica-se, tal como no ensaio do azul de metileno, que a expansibilidade dos finos de CRV foi mais influenciada pela adição da bentonite do que a expansibilidade dos finos de FML. Com efeito, no ensaio pelo método LNEC, enquanto a adição de 2% de bentonite foi responsável por um aumento da expansibilidade de cerca de 2,1 vezes em CRV, em FML o aumento foi de apenas de

cerca de 1,3 vezes. No ensaio pelo método de Holtz e Gibbs, observa-se a mesma tendência; enquanto em CRV a adição de 2% de bentonite aumentou o potencial de expansibilidade dos finos de fraco para médio, em FML o potencial de expansibilidade manteve-se fraco.

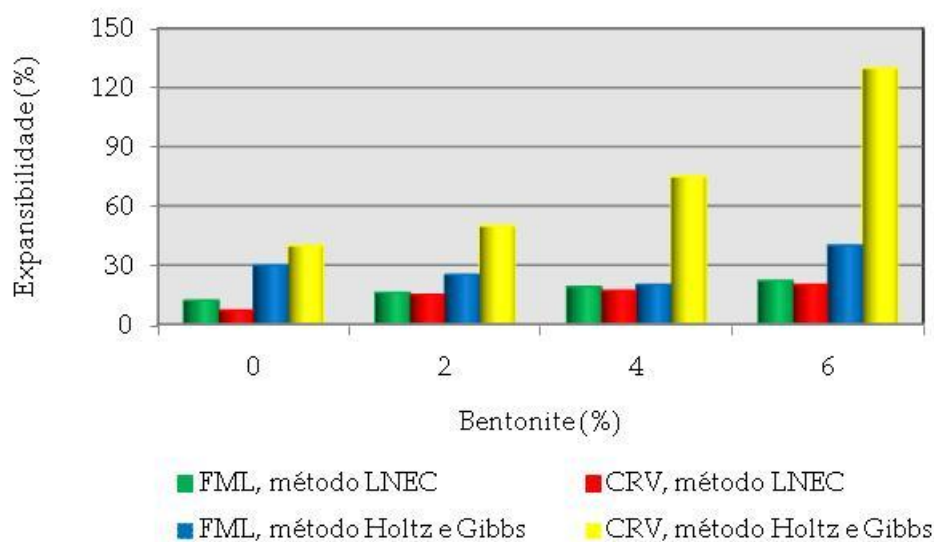


Figura 2.9 - Comparação da expansibilidade livre das misturas finos-bentonite com a dos finos das pedreiras, segundo os dois métodos.

Na Figura 2.10 e na Figura 2.11 são apresentados, respectivamente, o peso volúmico seco máximo e o teor em água ótimo obtidos pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, para as misturas finos-bentonite e para os finos das pedreiras (valor nulo nos gráficos).

Comparando os valores dos parâmetros de compactação das misturas com os dos finos, verifica-se que praticamente não variaram. Ainda que pouco significativas, as maiores alterações ocorrem no valor de  $\gamma_{dmax}$  da mistura dos finos de CRV com 6% de bentonite, compactada pelo método Proctor modificado e nos valores de  $w_{opn}$  e  $w_{opm}$  da mistura dos finos de FML com 6% de bentonite.

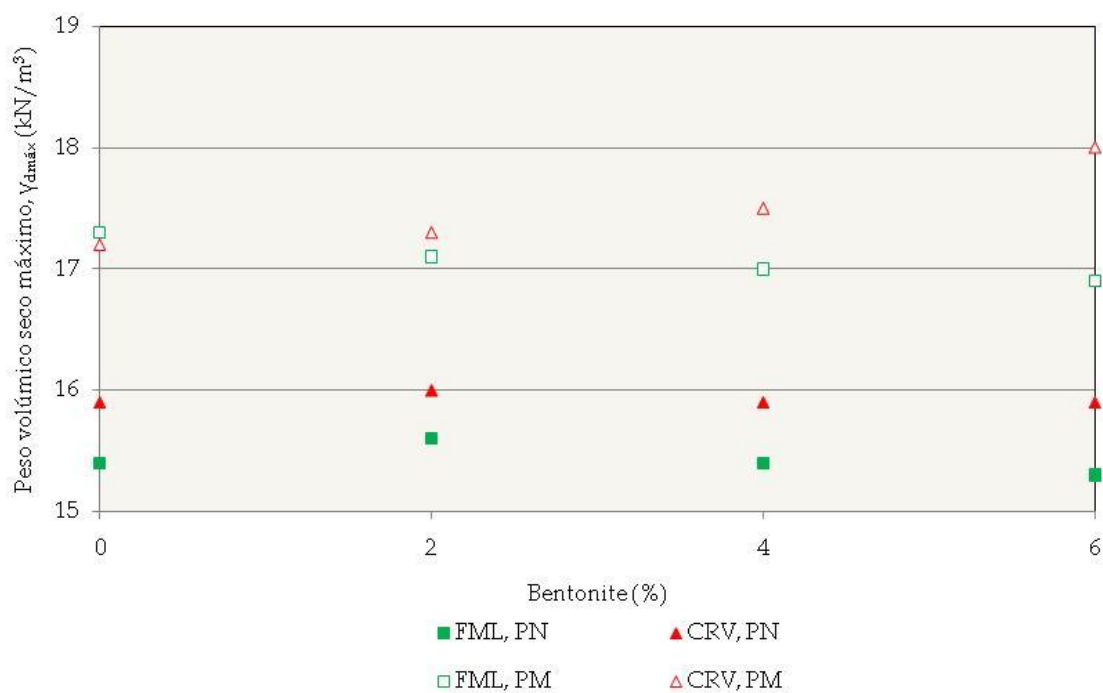


Figura 2.10 - Comparação do peso volúmico seco máximo das misturas finos-bentonite com o dos finos das pedreiras, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).

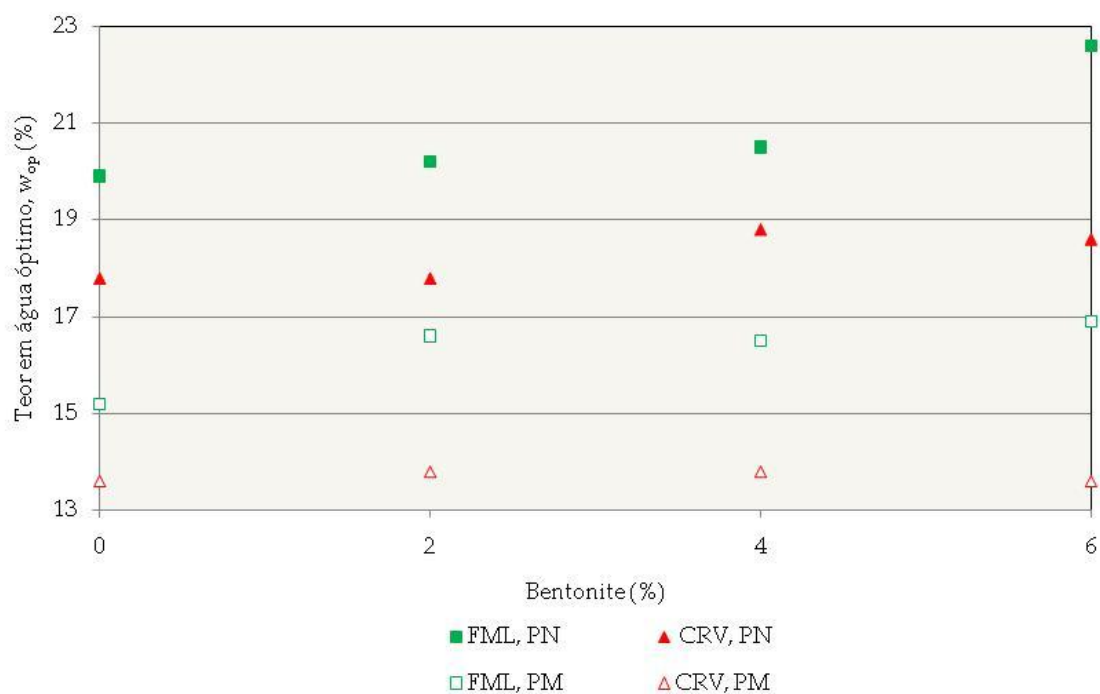


Figura 2.11 - Comparação do teor em água ótimo das misturas com o dos finos das pedreiras, pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).

## 2.5. ESTUDO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os ensaios de permeabilidade para o estudo da condutividade hidráulica das misturas dos finos das pedreiras com a bentonite sódica natural foram efectuados em permeâmetros de parede rígida, segundo a norma ASTM D 5856-95 (2007) e as metodologias propostas por Roque (2001).

Os provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade, num total de 12, foram preparados a partir da mistura dos finos de FML e de CRV com as diferentes percentagens de bentonite (2%, 4% e 6%, em relação ao peso dos finos secos), e teores em água 2% inferior ao teor em água óptimo Proctor normal ( $w_{opn-2\%}$ ) e ao teor em água óptimo Proctor modificado ( $w_{opm-2\%}$ ).

A duração total de cada ensaio de permeabilidade foi de cerca de 1,5 a 2 meses. Segundo Abichou *et al.* (2002), estes ensaios podem durar vários meses quando os teores em bentonite são elevados.

### 2.5.1. Equipamento

O equipamento utilizado consistiu num permeâmetro (Figura 2.12), comumente designado por permeâmetro de paredes rígidas, formado por uma base e uma cobertura em policloreto de vinila (PVC), separadas por um anel em aço inoxidável com diâmetro interior de 101,6 mm e altura de 50 mm. Tanto a base como a cobertura contêm um anel de vedação (O-ring) e uma pedra porosa (Figura 2.13), sendo a função da pedra porosa a de garantir uma percolação unidireccional através do provete e a do anel de vedação a estanqueidade entre a base e o anel e entre a cobertura e o anel.



Figura 2.12 - Permeâmetro de parede rígida utilizado nos ensaios de permeabilidade.



Figura 2.13 - Vista interna de um permeâmetro de parede rígida.

Como se pode observar pela Figura 2.12, o permeâmetro apresenta três torneiras:

- 1) a torneira situada na parte superior da cobertura permite fazer a purga (expulsão do ar);
- 2) a torneira na parede lateral da cobertura permite a entrada da solução percolante;

- 3) a torneira na parede lateral da base do permeâmetro permite a recolha da solução percolada.

Para armazenamento das soluções a montante do permeâmetro (soluções influentes), foram utilizados reservatórios feitos em acrílico, de capacidade aproximada de 1200 ml e 2400 ml (Figura 2.14). Estes reservatórios foram adaptados para permitir a realização dos ensaios com carga constante, tomando neste caso a designação de “garrafas de Mariotte”.



Figura 2.14 - Reservatório em acrílico para armazenamento da solução influente.

Na recolha das soluções efluentes foram utilizados dois tipos de reservatório: copos em polietileno (PE) de 500 ml, e frascos em polietileno de alta densidade (PEHD) de 2700 ml, ambos com tampa (Figura 2.15), para evitar a evaporação entre as leituras. O reservatório de maior volume era utilizado nos ensaios com maior caudal.



Figura 2.15 - Reservatórios para recolha da solução efluente.

Por último, a ligação entre os reservatórios e os permeâmetros foi efectuada através da associação de tubos em poliamida, rígidos, transparentes, de diâmetro interior de 6,0 mm e exterior de 8,0 mm, a tubos de silicone, flexíveis, transparentes, de diâmetro interior de 8,0 mm e exterior de 10,0 mm.

### **2.5.2. Preparação e propriedades físicas iniciais dos provetes das misturas**

Os ensaios de permeabilidade das misturas dos finos das duas pedreiras com as percentagens de 2%, 4% e 6% de bentonite, foram realizados sobre provetes com teores em água 2% inferiores aos teores em água óptimos Proctor normal e Proctor modificado. No Quadro 2.13 apresenta-se o programa de ensaios de permeabilidade implementado, que perfaz um total de 12 provetes, como referido anteriormente.

Com a preparação deste conjunto de provetes pretendeu-se avaliar a influência da percentagem de bentonite e da energia de compactação na condutividade hidráulica das misturas.



Quadro 2.13 - Programa dos ensaios de permeabilidade efectuados sobre as misturas de FML e CRV com bentonite.

Compacção	FML + %bentonite			CRV + %bentonite		
Proctor normal ( $w_{opn-2\%}$ )	2%	4%	6%	2%	4%	6%
Proctor modificado ( $w_{opm-2\%}$ )						

Os provetes de ensaio foram preparados da seguinte forma:

- 1) secagem dos finos das pedreiras na estufa, a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ , durante pelo menos 48 horas;
- 2) adição da bentonite aos finos na percentagem pretendida (2%, 4% e 6%, em relação ao peso dos finos secos);
- 3) mistura manual dos dois materiais até obtenção de uma massa homogénea;
- 4) avaliação da quantidade de da água necessária para se obter o teor em água pretendido ( $w_{opn-2\%}$  ou  $w_{opm-2\%}$ ), estimado a partir das curvas de compactação Proctor normal e Proctor modificado apresentadas na Figura 2.6 e na Figura 2.7, respectivamente;
- 5) humedificação do material, efectuada através de vaporização de água, seguida de homogeneização da mistura;
- 6) compactação das misturas directamente nos anéis em aço inoxidável do permeâmetro.

Na compactação dos provetes, substituiu-se o molde pequeno do ensaio Proctor, com altura de 115,0 mm, pelo anel em aço inoxidável do permeâmetro, com altura de 50,0 mm. A alonga do ensaio Proctor, com altura de 50,0 mm, também foi substituída por uma alonga adequada para o anel utilizado, com altura de 125 mm (Figura 2.16).

A moldagem do provete directamente no anel do permeâmetro visou garantir a estanqueidade entre o provete e o anel, e, assim, impedir percolações preferenciais ao longo desta descontinuidade. Em resultado da substituição do molde pequeno pelo anel, a massa de material utilizada na preparação de cada provete era cerca de um terço da massa necessária para efectuar cada um dos ensaios necessários à definição da curva de compactação do ensaio Proctor.

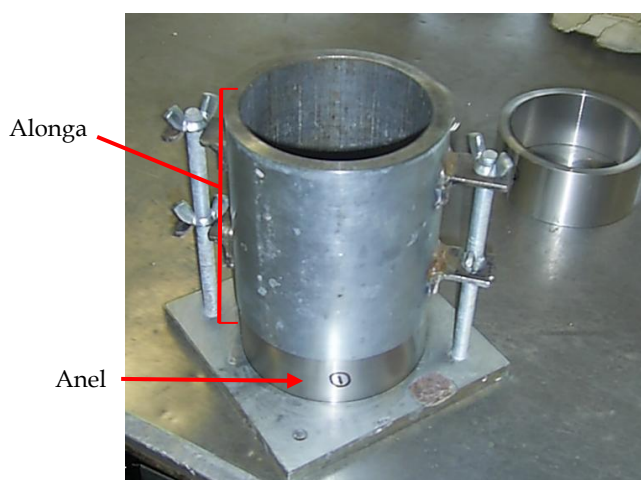


Figura 2.16 - Anel e alonga utilizados na compactação dos provetes.

Após a compactação das misturas, o material excedente era removido de dentro da alonga, até se verificarem as condições necessárias para a sua extracção sem ocorrer o risco de danificação do provete. Posteriormente, todo o material exterior ao anel foi cuidadosamente rasado, obtendo-se assim o provete (Figura 2.17) necessário para os ensaios de permeabilidade. O material excedente foi pesado e seco a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , para a determinação do teor em água.



Figura 2.17 - Provete de ensaio compactado no anel de aço.

Antes de proceder à montagem dos provetes nos permeâmetros, era colocado um papel de filtro de protecção à pedra porosa, para evitar a sua eventual colmatção pelos finos que migrassem a partir da mistura.

Na Figura 2.18 encontram-se representados os teores em água,  $w$ , e os pesos volúmicos secos,  $\gamma_d$ , dos 6 provetes preparados a partir da mistura dos finos de FML com a bentonite pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, e na Figura 2.19 os 6 provetes preparados a partir da mistura dos finos de CRV com a bentonite, pelos mesmos métodos.

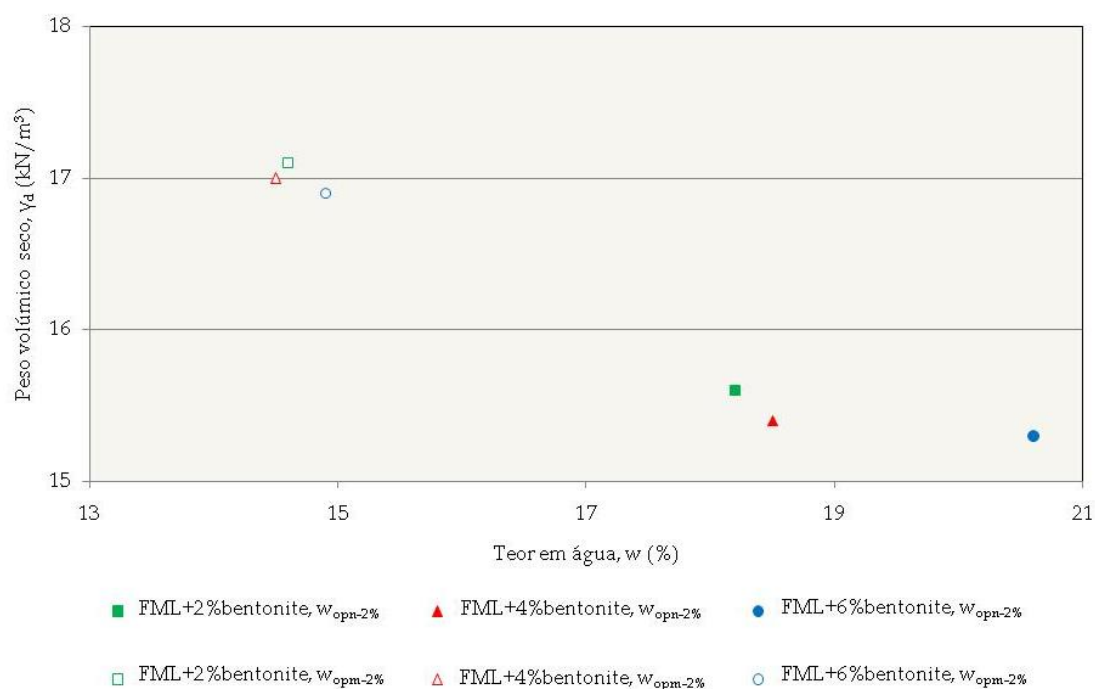


Figura 2.18 - Representação dos provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade, preparados a partir da mistura dos finos de FML com as três percentagens de bentonite, pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado.

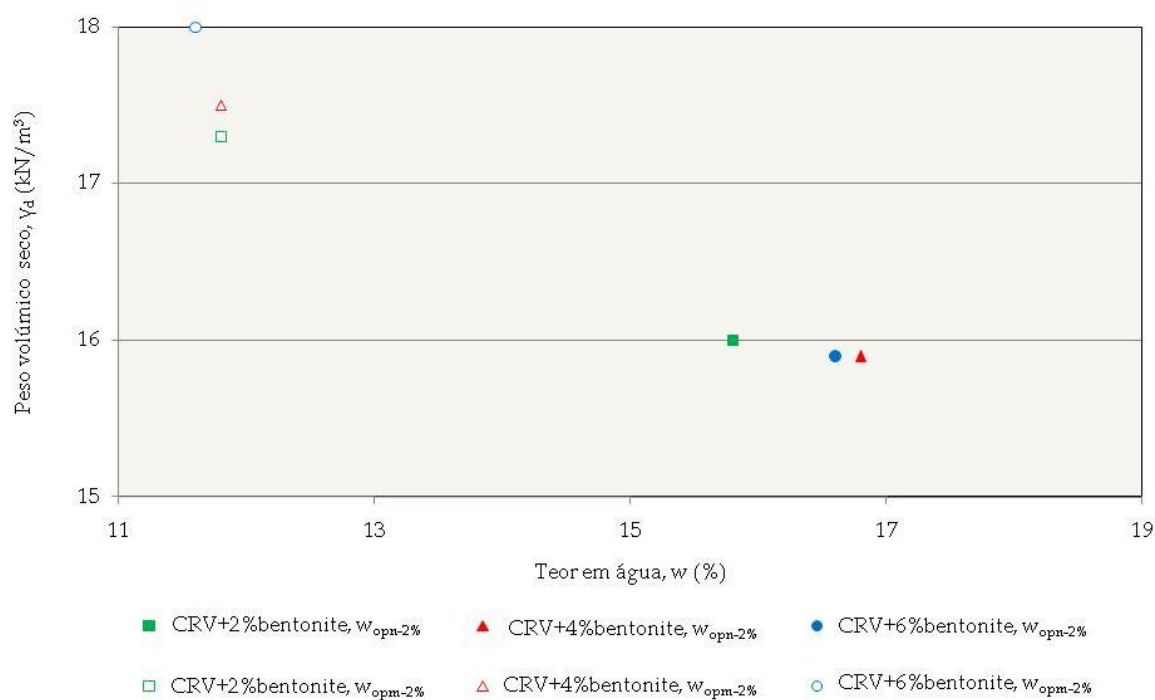


Figura 2.19 - Representação dos provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade, preparados a partir da mistura dos finos de CRV com as três percentagens de bentonite, pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado.

### 2.5.3. Percolação dos provetes das misturas

Como solução influente nos ensaios de permeabilidade, utilizou-se água desmineralizada, com condutividade eléctrica inferior a  $1,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ , proveniente da purificação da água da rede de abastecimento público, em equipamento com coluna de resina sintética, a qual promove a adsorção dos iões dissolvidos na água. O uso da água desmineralizada, como solução percolante, teve como objectivo a realização dos ensaios de permeabilidade tendo como ponto de partida uma solução pura de referência.

Outro factor a ter em conta neste tipo de ensaios, é a temperatura ambiente. Como se sabe, a temperatura influencia a viscosidade da água, alterando as condições de percolação da água através do solo. A temperatura de referência habitualmente utilizada, de modo a que a condutividade hidráulica,  $k$ , e a permeabilidade intrínseca,  $K$ , sejam idênticas, é a de  $20^\circ\text{C}$ . Como tal, a temperatura ambiente do laboratório onde decorreram os ensaios de permeabilidade foi mantida à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

Na percolação dos provetes foi adoptada a infiltração descendente, com expulsão do ar pela base, por simular melhor a percolação que ocorre na grande maioria das obras geotécnicas em que estes materiais podem vir a ser aplicados, como sejam, por exemplo, as barreiras de confinamento basal e de cobertura final presentes nos aterros de resíduos.

Os ensaios de permeabilidade realizaram-se a carga constante, tendo-se aplicado quatro patamares de carga hidráulica: 20, 50, 100 e 200 cm. Para além de se pretender observar o desempenho das misturas com diferentes valores de gradiente hidráulico, também se pretendia verificar se os ensaios se realizavam no domínio de validade da lei de Darcy.

Na fase inicial dos ensaios, a carga hidráulica foi sempre muito baixa (20 cm), para que o provete pudesse saturar lentamente e, assim, minimizar-se a formação de percursos de percolação preferenciais.

O número de dias de ensaio sem recolha de solução efluente variou entre um e vinte e três dias, nos 12 provetes ensaiados. Nas secções seguintes são comentados estes valores, tendo em conta os resultados obtidos para a condutividade hidráulica.

O critério adoptado para passar de um patamar de carga hidráulica a outro foi a verificação de que o valor da condutividade hidráulica já não variava ao longo do tempo, ou que esta variação era residual.

Este critério assemelha-se a um recomendado por Daniel (1994) e que também foi utilizado por Chalermyanont e Arrykul (2005).

Os autores recomendam que a percolação deva ser mantida até:

- 1) a quantidade de água que entra e que sai ser aproximadamente igual;
- 2) os valores da condutividade hidráulica apresentarem-se estáveis.

O Quadro 2.14 apresenta a duração aproximada dos ensaios de permeabilidade, em dias, para cada patamar de carga hidráulica (20, 50, 100 e 200 cm), nos 12 provetes. No mesmo quadro também é apresentada a duração total de cada ensaio, que foi de cerca de 1,5 a 2 meses.

Quadro 2.14 - Duração aproximada de cada patamar de carga hidráulica nos ensaios de permeabilidade.

Provetes		Compactação	Carga hidráulica (cm)					Tempo total (dias)
			(1)	20	50	100	200	
			Tempo (dias)					
FML + %bentonite	2%	Proctor normal	4	14	11	12	15	56
	4%		4	14	11	12	15	56
	6%		9	17	10	13	18	67
	2%	Proctor modificado	9	20	15	9	11	64
	4%		23	13	8	9	11	64
	6%		21	15	8	9	11	64
CRV + %bentonite	2%	Proctor normal	8	13	13	14	12	60
	4%		9	13	13	14	12	61
	6%		8	14	13	14	12	61
	2%	Proctor modificado	2	11	14	12	14	53
	4%		1	11	14	12	14	52
	6%		1	11	14	12	14	52

(1) Valores na primeira coluna indicam o número de dias até à primeira recolha de solução efluente.

A partir do momento em que a solução efluente passou a ser recolhida, começou a proceder-se, periodicamente, à realização das seguintes operações:

- registo da massa da solução efluente percolada;
- medição do pH e da condutividade eléctrica (CE) da solução efluente.

A condutividade hidráulica foi calculada, entre cada duas pesagens da massa de solução efluente recolhida, a partir da expressão seguinte:

$$k = \frac{VL}{Ath} \quad (2)$$

onde:

k = condutividade hidráulica (m/s);

V = volume de solução efluente (m<sup>3</sup>)\*;

L = altura do provete (m);

$A$  = área da secção transversal do provete ( $m^2$ );

$t$  = intervalo de tempo entre duas recolhas da solução efluente (s);

$h$  = carga hidráulica (m).

\* Considerou-se que o peso volúmico da solução efluente seria igual ao peso volúmico da água, ou seja,  $10 \text{ kN/m}^3$ .

Os valores de pH e de CE da solução efluente, medidos periodicamente, permitem avaliar a evolução destes parâmetros ao longo de cada ensaio de permeabilidade.

#### **2.5.4. Condutividade hidráulica e propriedades físicas finais dos provetes das misturas**

Nesta subsecção analisam-se, primeiro, a condutividade hidráulica das misturas e a evolução do pH e da CE da solução efluente ao longo do tempo, e, por último, as propriedades físicas dos provetes, antes e depois da realização dos ensaios de permeabilidade.

##### **2.5.4.1. Misturas dos finos de FML com bentonite**

###### **Condutividade hidráulica**

Na Figura 2.20 apresenta-se a variação da condutividade hidráulica das misturas compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado em função do tempo de ensaio.



Nas misturas compactadas pelo método Proctor normal, o valor de  $k$  foi mais estável durante o ensaio de permeabilidade, do que nas misturas compactadas pelo método Proctor modificado, onde se registaram variações significativas nos primeiros 30 dias de ensaio. Nestes primeiros 30 dias, a carga hidráulica aplicada era de 20 cm.

Como evidenciam as curvas apresentadas, os ensaios de permeabilidade terminaram em condições de estabilização para o valor da condutividade hidráulica. As cinéticas de  $k$  em função de  $t$  obtidas nos provetes ensaiados, também permitem concluir que, em cada ensaio, o valor de  $k$  final não foi significativamente diferente do valor de  $k$  inicial.

O Quadro 2.15 apresenta uma síntese dos resultados obtidos. Os valores da condutividade hidráulica apresentados correspondem à média dos valores da condutividade hidráulica depois de se observar a sua estabilização, normalmente alcançada no último patamar de carga hidráulica, ou seja, 200 cm.

Os valores obtidos para  $k$  indicam que em ambas as energias de compactação se observa uma diminuição da condutividade hidráulica com o aumento da percentagem de bentonite e que o aumento da percentagem de bentonite diminuiu a importância da energia de compactação na condutividade hidráulica das misturas.

### *pH e condutividade eléctrica*

Tal como foi referido anteriormente, também foram registados periodicamente os valores do pH e da CE das soluções efluentes, mostrando a Figura 2.21 as suas variações em função do tempo de ensaio, nas misturas compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado.

Os gráficos que correspondem aos provetes compactados pelo método Proctor modificado apresentam menos medições de pH e de CE, devido ao facto do caudal nestes provetes ser inferior ao dos provetes compactados pelo método Proctor normal e das medições daqueles parâmetros só se efectuarem quando o volume de solução efluente recolhida era igual ou superior a 25 ml. Como é possível verificar

pelas curvas da Figura 2.21, este volume só foi atingido, entre 4 e 12 dias, nos provetes compactados com  $w_{opn-2\%}$  e entre 18 e 40 dias, nos provetes compactados com  $w_{opm-2\%}$ .

As curvas da Figura 2.21 mostram que o pH da solução efluente dos seis provetes praticamente não variou ao longo dos ensaios. À exceção dos provetes FML+2%bentonite e FML+4%bentonite, o valor do pH variou entre 8,00 e 9,20. Nos dois provetes mencionados, a amplitude de variação foi a mesma, mas o valor do pH situou-se entre 7,40 e 8,20.

No que se refere à CE da solução efluente, observa-se que, em todos os provetes, houve diminuição do seu valor ao longo do ensaio. Nos provetes com 2% e 4% de bentonite, compactados pelo método Proctor normal, o valor final da CE da solução efluente situava-se muito perto de zero, evidenciando o quase esgotamento dos sais solúveis nas misturas. Também se observa que para a mesma percentagem de bentonite, o valor final da CE foi menor nos provetes compactados pelo método Proctor normal do que pelo método Proctor modificado.



Mistura dos finos de FML + %bentonite

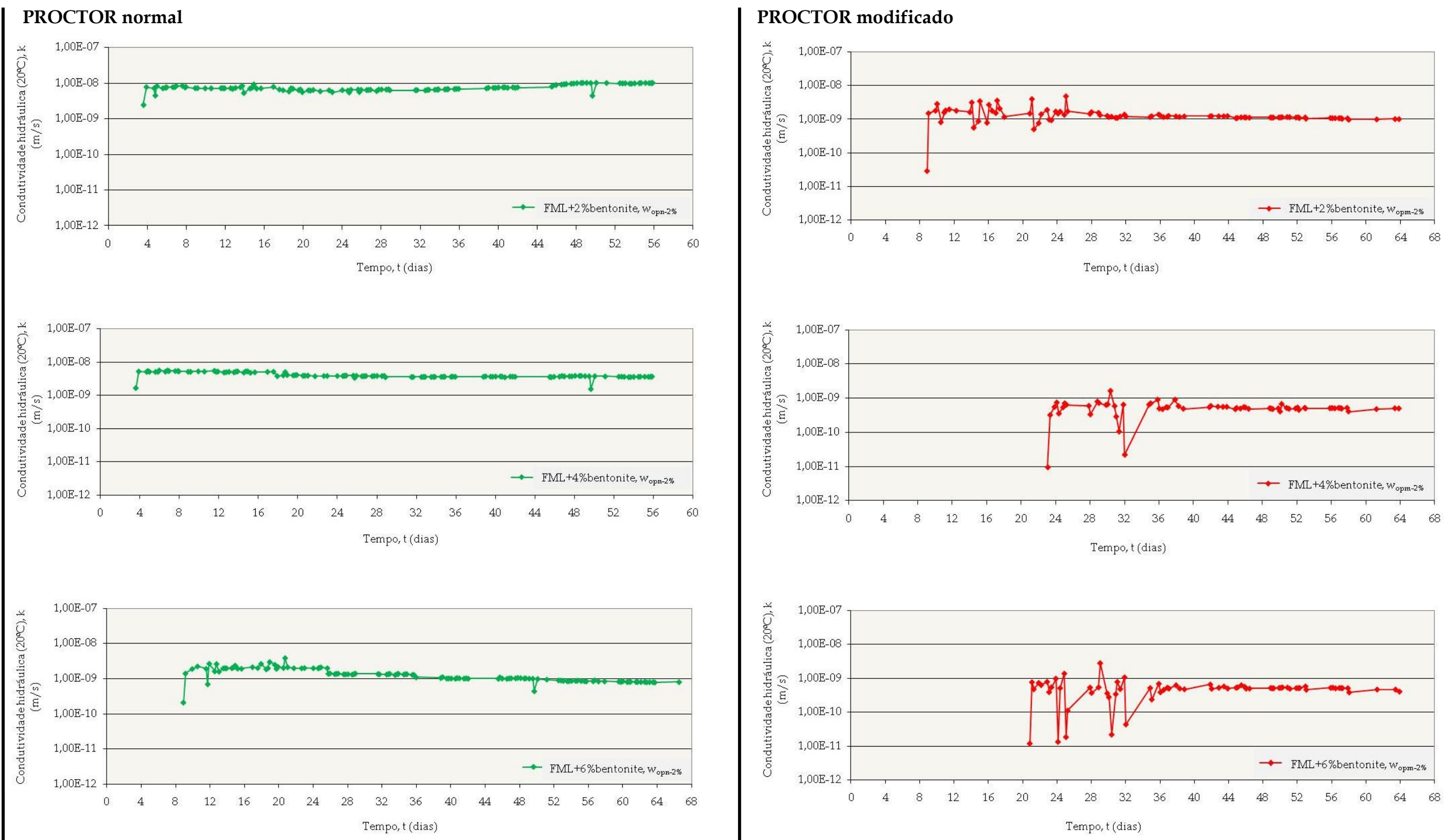
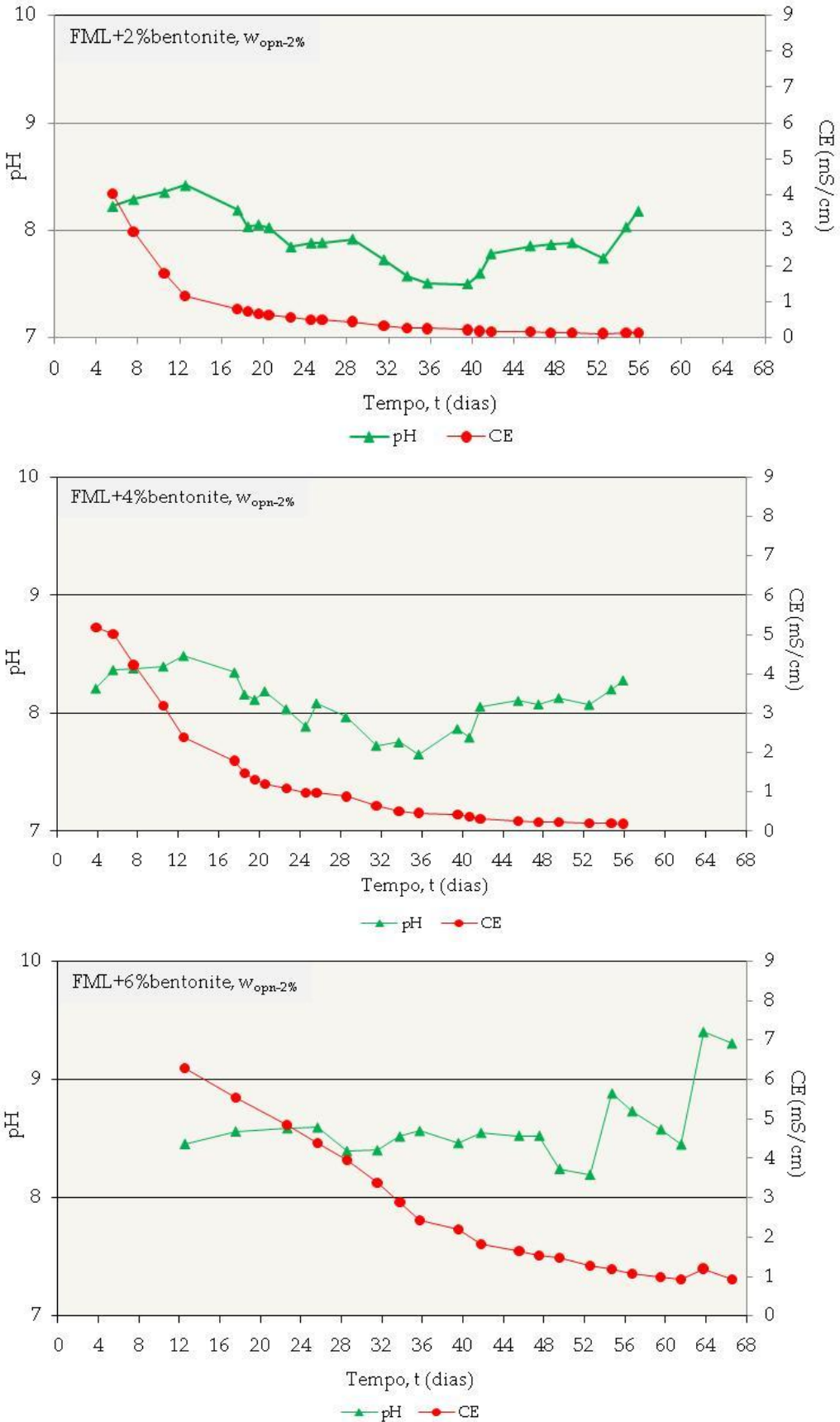


Figura 2.20 - Condutividade hidráulica das misturas dos finos de FML com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.



Misturas dos finos de FML + % bentonite

PROCTOR normal



PROCTOR modificado

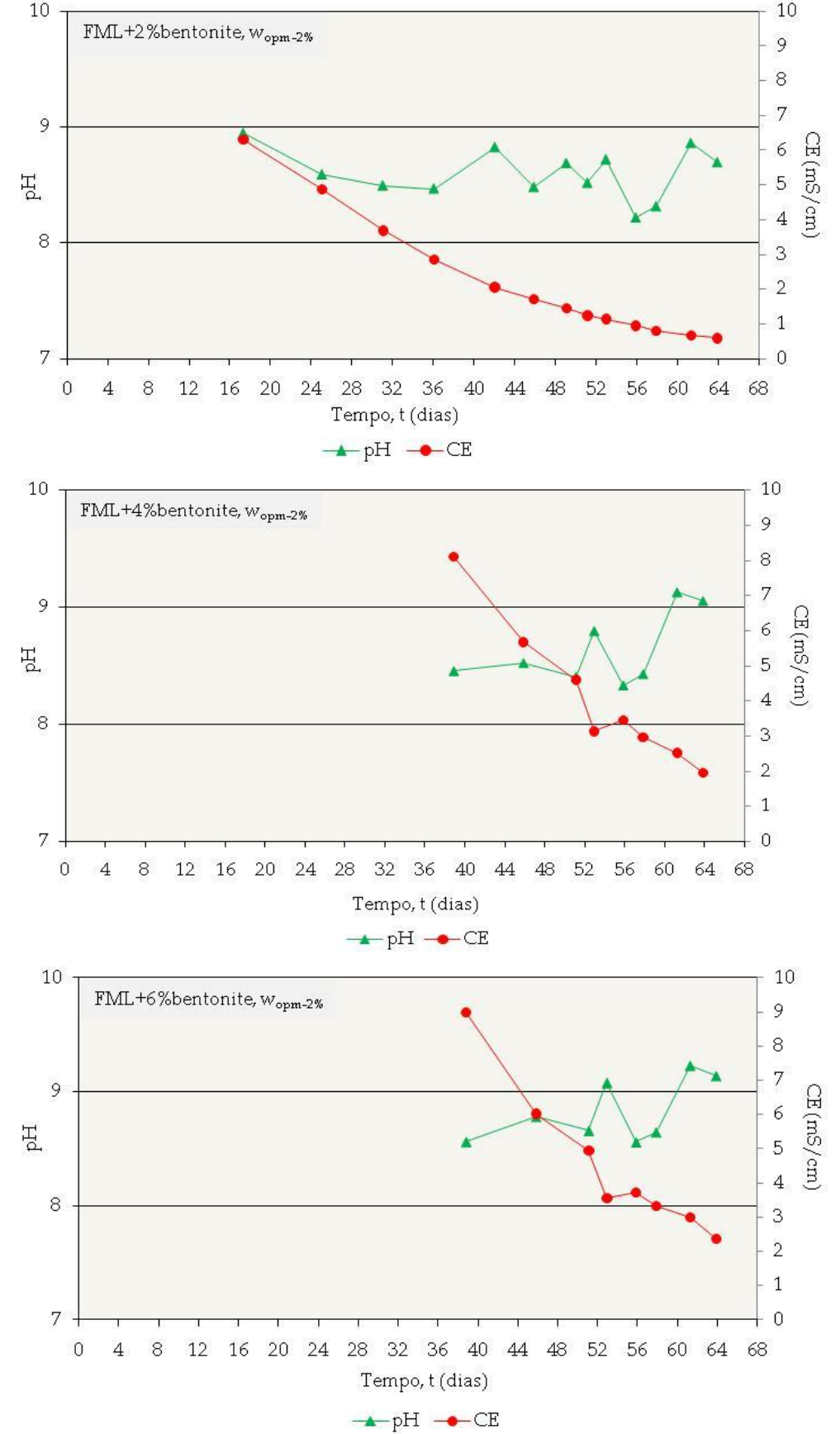


Figura 2.21 - pH e condutividade eléctrica das misturas dos finos de FML com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.



Quadro 2.15 - Síntese dos resultados dos ensaios de permeabilidade efectuados nas misturas de FML com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).

Parâmetro		FML + %bentonite		
		2%	4%	6%
PN	$w_{opn-2\%}$ (%)	18,2	18,5	20,6
	Tempo, t (dias)	56	56	67
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$9,2 \times 10^{-9}$	$3,6 \times 10^{-9}$	$0,85 \times 10^{-9}$
	pH	inicial	8,22	8,21
		final	8,18	8,28
	CE (mS/cm)	inicial	4,02	5,19
		final	0,14	0,19
PM	$w_{opm-2\%}$ (%)	14,6	14,5	14,9
	Tempo, t (dias)	64	64	64
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$1,1 \times 10^{-9}$	$0,49 \times 10^{-9}$	$0,48 \times 10^{-9}$
	pH	inicial	8,95	8,46
		final	8,69	9,05
	CE (mS/cm)	inicial	6,32	8,10
		final	0,59	1,95

### Propriedades físicas

No final de cada ensaio de permeabilidade, os anéis eram retirados dos permeâmetros e pesados. Após a pesagem, procedeu-se à determinação do teor em água do provete, segundo a Norma Portuguesa NP - 84 (1965). A determinação do teor em água foi efectuada em três sectores do provete: no topo, a meia altura e na base.

As propriedades físicas dos provetes de FML com bentonite compactados pelo método Proctor normal (PN), antes e depois do ensaio de permeabilidade, são



apresentadas no Quadro 2.16 e pelo método Proctor modificado (PM), no Quadro 2.17.

Quadro 2.16 - Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de FML com bentonite, compactados pelo método Proctor normal (PN).

Parâmetro			Símbolo	Unidade	FML + %bentonite		
					2%	4%	6%
PN	Antes da fase de percolação	Teor em água	w	%	18,2	18,5	20,6
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	15,6	15,4	15,3
		Grau de saturação	Sr	%	63,2	66,4	74,9
		Índice de vazios	e	-	0,78	0,76	0,74
		Porosidade total	n	-	43,9	43,2	42,4
	Após a fase de percolação	Teor em água	w	%	27,7	25,5	25,7
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	15,6	15,4	15,3
		Grau de saturação	Sr	%	98,7	94,3	95,8
		Índice de vazios	e	-	0,77	0,75	0,74
		Porosidade total	n	-	43,6	42,8	42,5

Quadro 2.17 - Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de FML com bentonite, compactados pelo método Proctor modificado (PM).

Parâmetro			Símbolo	Unidade	FML + %bentonite		
					2%	4%	6%
PM	Antes da fase de percolação	Teor em água	w	%	14,6	14,5	14,9
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	17,1	17	16,9
		Grau de saturação	Sr	%	64,9	69,0	67,5
		Índice de vazios	e	-	0,61	0,58	0,63
		Porosidade total	n	-	37,97	36,88	38,48
	Após a fase de percolação	Teor em água	w	%	19,7	18,8	20,2
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	17,1	17,0	16,9
		Grau de saturação	Sr	%	90,6	90,7	91,6
		Índice de vazios	e	-	0,60	0,57	0,61
		Porosidade total	n	-	37,5	36,3	37,8

Analisando o Quadro 2.16, observa-se que os parâmetros em que ocorreram as maiores alterações após a realização dos ensaios foram: o teor em água e o grau de

saturação. Os valores do índice de vazios, da porosidade e do peso volúmico seco são de ordem de grandeza semelhante, antes e após a fase de percolação.

Os provetes com grau de saturação mais elevado no final dos ensaios foram os compactados pelo método Proctor normal. Contudo, para os valores do grau de saturação alcançados, todos superiores a 90%, a permeabilidade das misturas já não é significativamente influenciada.

Também se observa que em relação ao teor em água inicial dos provetes, o teor em água final aumentou mais nos provetes compactados pelo método Proctor normal do que pelo método Proctor modificado.

A Figura 2.22 apresenta a base do provete FML+6%bentonite, compactado pelo método Proctor normal, após o ensaio de permeabilidade. É possível observar no papel de filtro a existência de manchas escuras e esverdeadas, as quais devem resultar da presença de matéria orgânica. Esta situação ocorreu em todos os provetes, ou seja, tanto nos compactados pelo método Proctor normal como pelo método Proctor modificado.

Após a remoção do papel de filtro, o provete tinha o aspecto que a Figura 2.23 ilustra.



Figura 2.22 - Base do provete da mistura dos finos de FML com 6% de bentonite, no final do ensaio de permeabilidade, antes da remoção do papel de filtro.

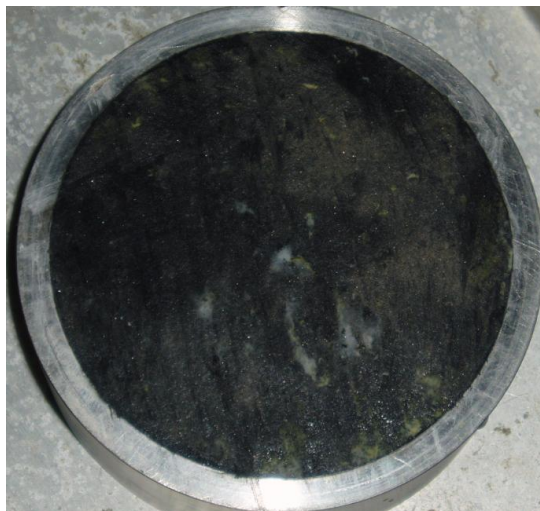


Figura 2.23 - Base do provete da mistura dos finos de FML com 6% de bentonite, no final do ensaio de permeabilidade, após a remoção do papel de filtro.

No ensaio de permeabilidade com o provete FML+4% de bentonite, compactado pelo método Proctor normal, observou-se, no tubo que ligava a torneira inferior do permeâmetro ao copo de recolha do efluente, o aparecimento de material de cor escura, que foi associado à deposição de matéria orgânica.

#### **2.5.4.2. Misturas dos finos de CRV com bentonite**

##### **Condutividade hidráulica**

Na Figura 2.24 apresenta-se a variação da condutividade hidráulica em função do tempo de ensaio nos provetes das misturas compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado.

Contrariamente ao observado nos provetes de FML compactados pelo método Proctor modificado, onde se registaram variações significativas no valor de  $k$  nos primeiros 30 dias dos ensaios de permeabilidade, com os provetes de CRV, o valor de  $k$  manteve-se aproximadamente uniforme durante a realização dos ensaios. Nas

misturas dos finos de CRV com a bentonite, compactadas pelo método Proctor normal, a estabilidade do valor de  $k$  ao longo do ensaio foi idêntica à observada nos respectivos provetes de FML.

Durante a realização dos ensaios de permeabilidade, verifica-se que houve dois provetes em que o valor final da condutividade hidráulica das misturas é de ordem de grandeza superior ao seu valor inicial (CRV+2%bentonite,  $w_{\text{opn-2\%}}$  e CRV+4%bentonite,  $w_{\text{opn-2\%}}$ ) e que nos restantes quatro se manteve aproximadamente igual.

Nestes provetes, bem como nos provetes de FML, não foi observada a perda de bentonite, tanto nos papéis de filtro, como nos copos de recolha dos efluentes.

O Quadro 2.18 apresenta uma síntese dos resultados obtidos. Conforme já foi referido, os valores da condutividade hidráulica correspondem à média dos valores da condutividade hidráulica depois de se observar a sua estabilização, normalmente alcançada no último patamar de carga hidráulica, ou seja, 200 cm.

Em ambas as energias de compactação se observa uma diminuição da condutividade hidráulica com o aumento da percentagem de bentonite, ainda que muito ligeira, e que a influência da energia de compactação aumenta com o aumento da percentagem de bentonite, contrariamente ao observado com FML.

### **pH e condutividade eléctrica**

Os valores do pH e da CE das soluções efluentes em função do tempo de ensaio são apresentados na Figura 2.25.

Comparativamente com os gráficos obtidos para FML, verifica-se haver um maior número de medições do pH e da CE das soluções efluentes, apesar da maior condutividade hidráulica dos provetes. Por este facto, as medições, que em FML eram realizadas quando o volume recolhido era igual ou superior a 25 ml, passaram a ser efectuadas em CRV de dois em dois dias, de uma forma geral.

As curvas da Figura 2.25 mostram que o pH da solução efluente dos seis provetes, praticamente não variou ao longo dos ensaios. Como é possível observar, os valores de pH medidos situam-se, na grande maioria, entre 7 e 8, excepto no provete CRV+6% bentonite,  $w_{opm-2\%}$ , em que o valor inicial de pH se situava acima de 9, diminuindo depois para valores entre 7 e 8.

Nestes provetes, o valor de CE alcançou em todos os provetes um valor nulo ou próximo, ao contrário do observado com os provetes de FML, em que apenas os compactados pelo método Proctor normal alcançaram valores próximos de zero.

Misturas dos finos de CRV + %bentonite

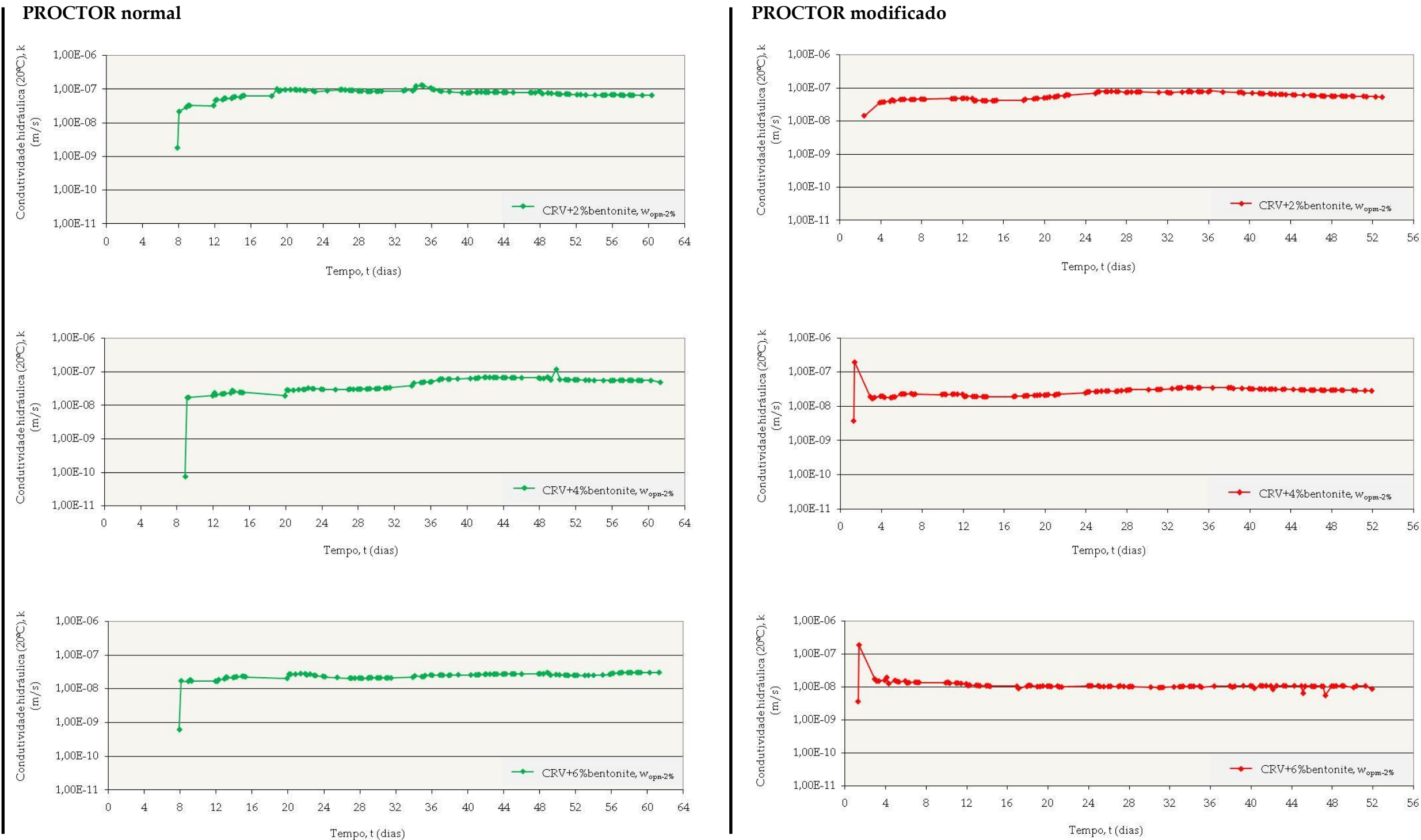
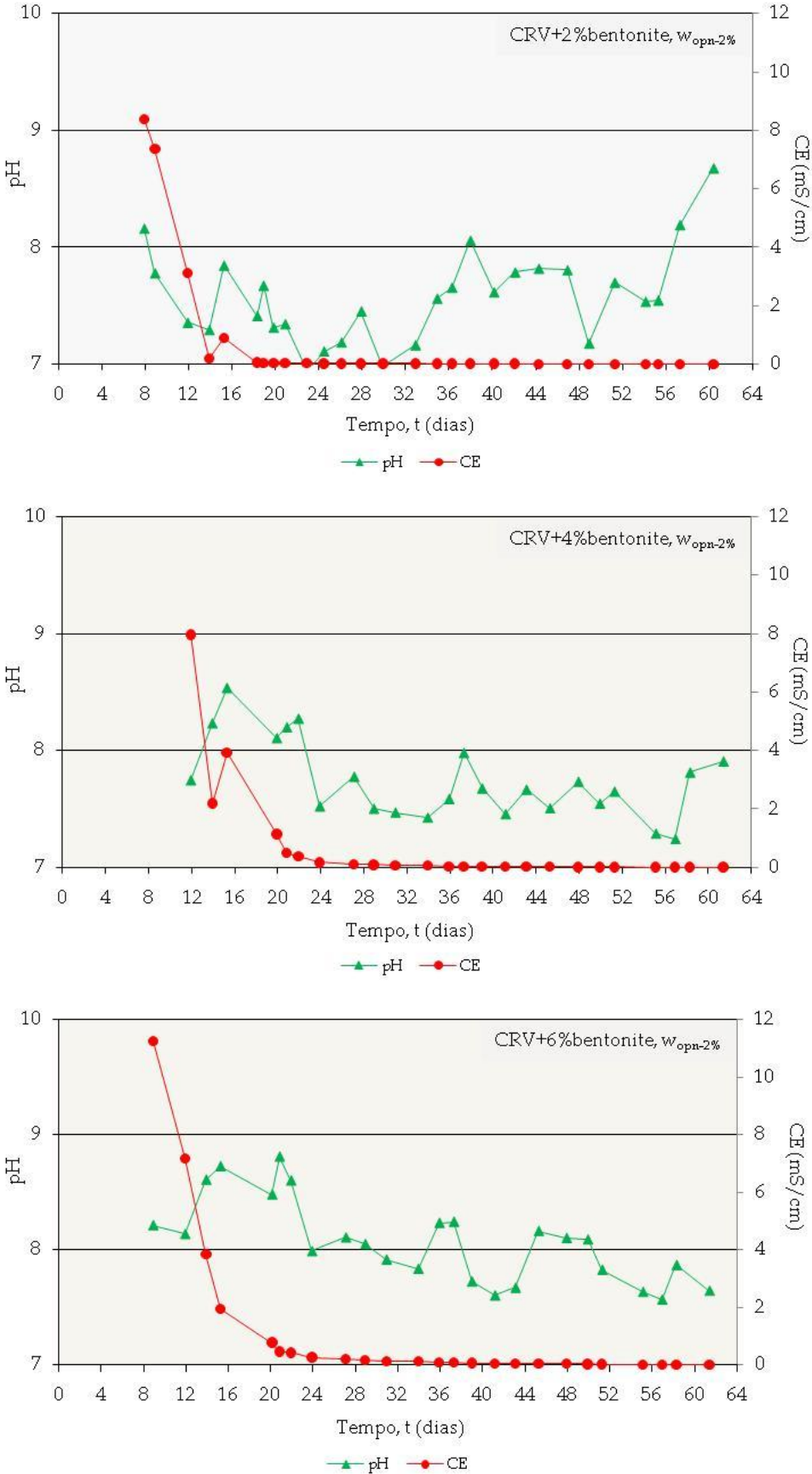


Figura 2.24 - Condutividade hidráulica das misturas dos finos de CRV com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.



Misturas dos finos de CRV + % bentonite

PROCTOR normal



PROCTOR modificado

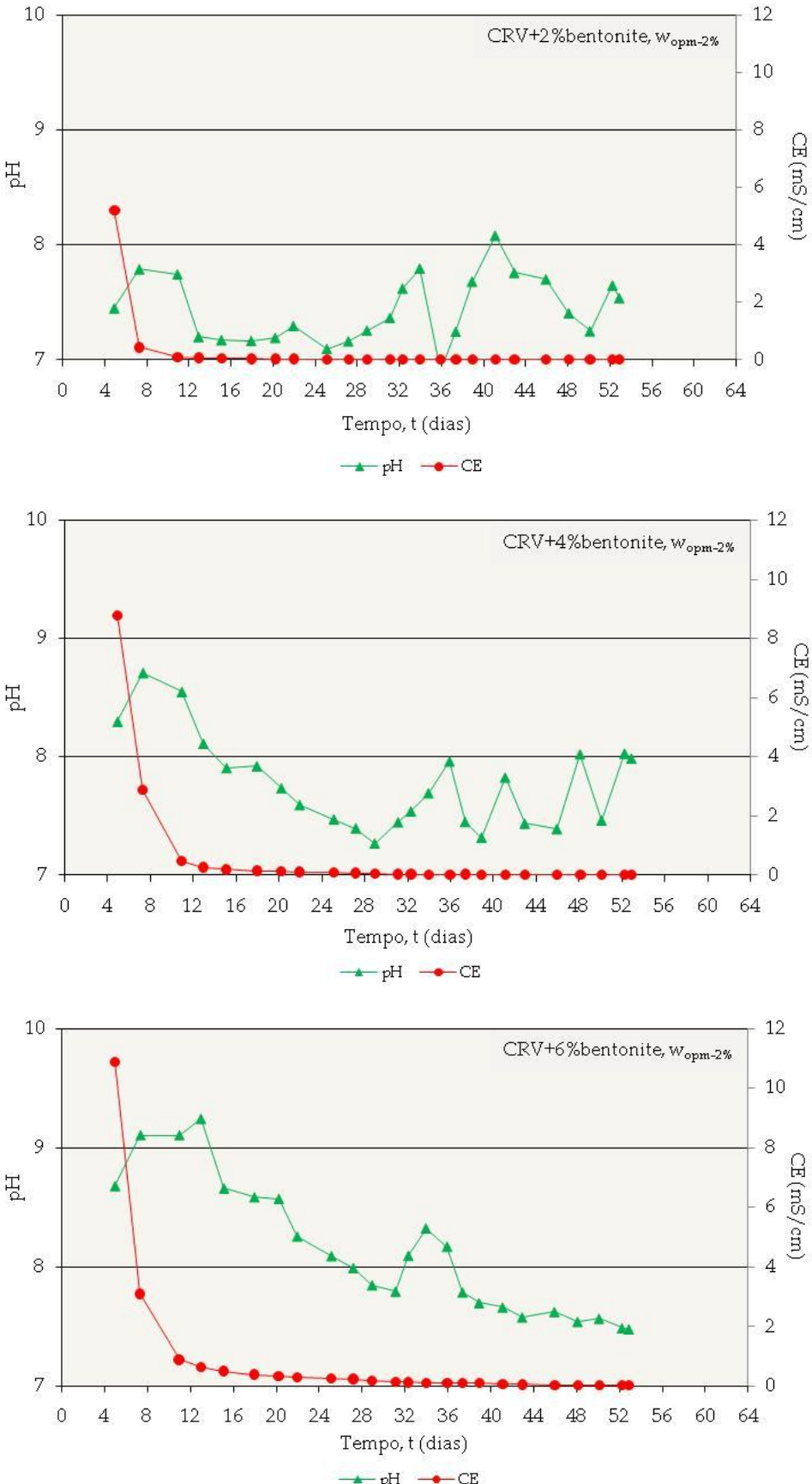


Figura 2.25 - pH e condutividade eléctrica das misturas dos finos de CRV com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, em função do tempo de ensaio.





Quadro 2.18 - Síntese dos resultados dos ensaios de permeabilidade efectuados nas misturas de CRV com bentonite, compactadas pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM).

Parâmetro		CRV + %bentonite		
		2%	4%	6%
PN	$w_{opn-2\%}$ (%)	15,8	16,8	16,6
	Tempo, t (dias)	60	61	61
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$69,0 \times 10^{-9}$	$59,0 \times 10^{-9}$	$27,0 \times 10^{-9}$
	pH	inicial	8,16	7,75
		final	8,68	7,91
	CE (mS/cm)	inicial	8,37	7,97
		final	0,00	0,01
PM	$w_{opm-2\%}$ (%)	11,8	11,8	11,6
	Tempo, t (dias)	53	52	52
	Condutividade hidráulica (20°C), k (m/s)	$61,0 \times 10^{-9}$	$31,0 \times 10^{-9}$	$10,0 \times 10^{-9}$
	pH	inicial	7,45	8,30
		final	7,54	7,99
	CE (mS/cm)	inicial	5,19	8,80
		final	0,01	0,01

### Propriedades físicas

Tal como foi efectuado para os provetes das misturas de FML com bentonite, no final de cada ensaio de permeabilidade, procedeu-se à determinação do teor em água dos provetes, tendo-se adoptado a mesma norma e os mesmos procedimentos.

O Quadro 2.19 e o Quadro 2.20 apresentam as propriedades físicas dos provetes de CRV com bentonite, compactados pelos métodos Proctor normal (PN) e Proctor modificado (PM), respectivamente, antes e depois do ensaio de permeabilidade.

Quadro 2.19 - Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de CRV com bentonite, compactados pelo método Proctor normal (PN).

Parâmetro			Símbolo	Unidade	CRV + % bentonite		
					2%	4%	6%
PN	Antes da fase de percolação	Teor em água	w	%	15,8	16,8	16,6
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	16	15,9	15,9
		Grau de saturação	Sr	%	75,0	73,9	77,1
		Índice de vazios	e	-	0,57	0,60	0,57
		Porosidade total	n	-	36,4	37,4	36,2
	Após a fase de percolação	Teor em água	w	%	26,9	25,3	25,5
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	16,0	15,9	15,9
		Grau de saturação	Sr	%	103,9	97,4	101,8
		Índice de vazios	e	-	0,70	0,71	0,68
		Porosidade total	n	-	41,3	41,4	40,5

Quadro 2.20 - Propriedades físicas iniciais e finais dos provetes de CRV com bentonite, compactados pelo método Proctor modificado (PM).

Parâmetro			Símbolo	Unidade	CRV + % bentonite		
					2%	4%	6%
PM	Antes da fase de percolação	Teor em água	w	%	11,8	11,8	11,6
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	17,3	17,5	18,0
		Grau de saturação	Sr	%	52,0	51,8	55,1
		Índice de vazios	e	-	0,62	0,62	0,57
		Porosidade total	n	-	38,2	38,3	36,4
	Após a fase de percolação	Teor em água	w	%	23,0	22,3	21,9
		Peso volúmico seco	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	17,3	17,5	18,0
		Grau de saturação	Sr	%	101,5	97,3	102,4
		Índice de vazios	E	-	0,62	0,62	0,58
		Porosidade total	N	-	38,1	38,4	36,7

Nos provetes de CRV também se observa, tal como nos de FML, que o teor em água e o grau de saturação dos provetes após os ensaios de permeabilidade aumentaram significativamente. O teor em água aumentou entre 8,86% e 11,09%, nos provetes compactados pelo método Proctor normal, e entre 10,25% e 11,29%, nos provetes compactados pelo método Proctor modificado. Também se observa que o aumento do teor em água final em relação ao inicial foi sempre maior no provete com menor percentagem de bentonite.

No caso do grau de saturação, observa-se que em quatro dos provetes ensaiados, o valor obtido foi superior a 100%, num máximo de 3,86%. Sendo um valor fisicamente impossível nos solos, admite-se que se possam ter cometido erros nos procedimentos para a sua determinação.

Nos provetes CRV compactados pelo método Proctor normal, o índice de vazios e a porosidade aumentaram significativamente no final dos ensaios de permeabilidade em relação aos valores obtidos antes da fase de percolação, contrariamente ao observado em todos os provetes de FML e nos de CRV compactados pelo método Proctor modificado. Por esse facto, admite-se que nos valores obtidos para o índice de vazios e para a porosidade total dos provetes CRV compactados pelo método Proctor normal possam ter sido cometidos erros nos procedimentos utilizados para a sua determinação.

A Figura 2.26 apresenta o topo do provete CRV+2%bentonite, compactado pelo método Proctor normal, após o ensaio de permeabilidade. É possível observar que o papel de filtro se encontra com muito menos manchas escuras e esverdeadas do queo observado nos provetes dos finos de FML com bentonite, indiciando ter havido um menor desenvolvimento de matéria orgânica. Os elementos recolhidos durante os ensaios não permitem avançar com uma explicação para o fenómeno observado, a não ser o facto da percentagem de matéria orgânica dos finos de FML ser de cerca de 1,9% e nos de CRV ser de cerca de 0,1%, de acordo com os dados apresentados por Frias *et al.* (2008).

A base do provete tinha o aspecto da Figura 2.27.



Figura 2.26 - Topo do provete da mistura dos finos de CRV com 2% de bentonite,  $w_{\text{opn-2\%}}$ , no final do ensaio de permeabilidade, com o papel de filtro.



Figura 2.27 - Base do provete da mistura dos finos de CRV com 4% de bentonite,  $w_{\text{opn-2\%}}$ , antes da remoção do papel de filtro.

Ao contrário do observado nos provetes dos finos de FML com 4% bentonite, não foi detectada, em nenhum dos ensaios realizados, a deposição de matéria orgânica nos tubos de ligação do permeâmetro ao copo de recepção do efluente.

### **2.5.5. Análise comparativa da condutividade hidráulica das misturas e dos finos das pedreiras**

Conforme mencionado na introdução geral, com o presente estudo pretende-se avaliar a influência da adição de pequenas percentagens de bentonite no valor da condutividade hidráulica dos finos das pedreiras de granito que estão a ser estudados no LNEC, no âmbito de um protocolo estabelecido com o Grupo ME, com o objectivo de viabilizar a sua valorização em barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais.

A necessidade desta investigação advém dos finos das duas pedreiras em estudo apresentarem valores de condutividade hidráulica superiores ao valor mínimo habitualmente exigido pelos regulamentos, ou seja, inferior ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, para as aplicações indicadas, como sejam, por exemplo, as barreiras de confinamento basal dos aterros de resíduos não perigosos e perigosos (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto).

Para facilitar e melhorar a comparação dos valores obtidos para a condutividade hidráulica dos finos das pedreiras com o aumento da percentagem de bentonite, apresentam-se na Figura 2.28 os valores da condutividade hidráulica obtidos neste trabalho para as misturas dos finos das pedreiras com as três percentagens de bentonite e os valores da condutividade hidráulica dos finos das mesmas pedreiras apresentados por Frias *et al.* (2008), em ambos os casos compactados pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado. Para os valores da condutividade hidráulica dos finos sem bentonite, adoptou-se o valor zero em percentagem de bentonite.

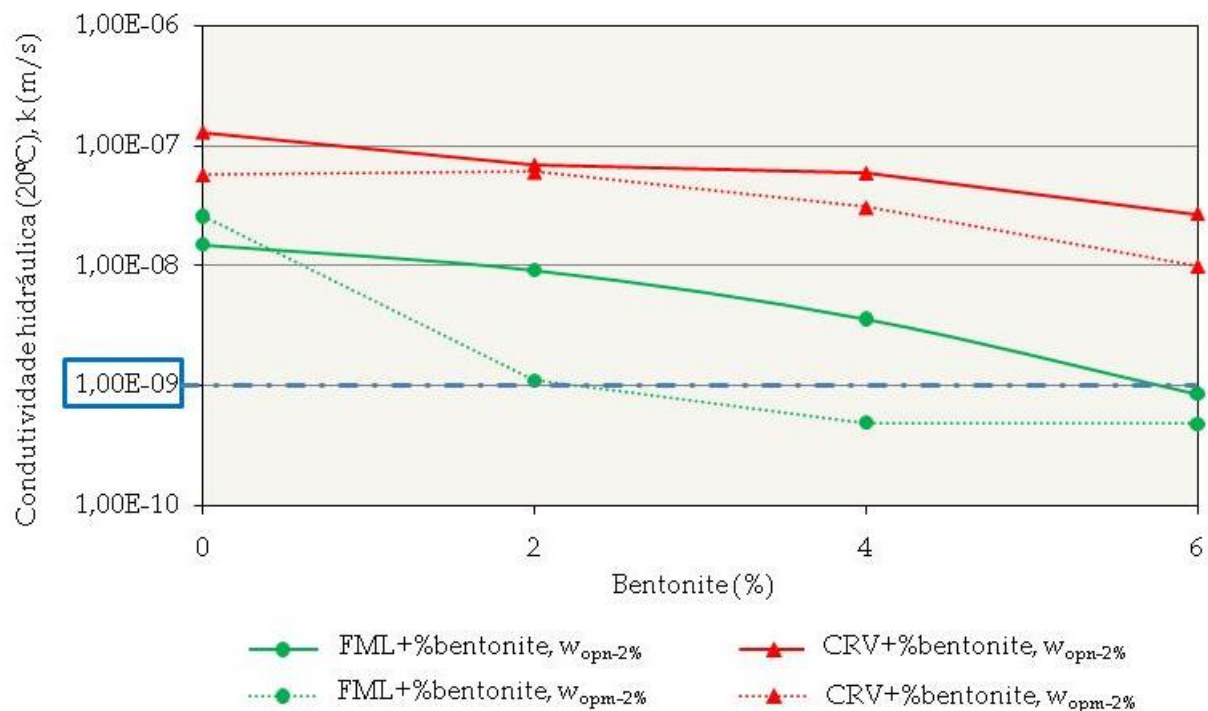


Figura 2.28 - Condutividade hidráulica dos finos das pedreiras e das misturas finos-bentonite, em função da percentagem de bentonite.

Verifica-se que a maior influência no valor da condutividade hidráulica resultante do tratamento dos finos das pedreiras com a bentonite, ocorreu nos finos de FML. Com efeito, nestes, o valor de  $k$  diminuiu cerca de 19 vezes, do provete compactado pelo método Proctor normal sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite e cerca de 53 vezes do provete compactado pelo método Proctor modificado sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite. Nos finos de CRV a diminuição foi de apenas 6,7 e 5,7 vezes, respectivamente.

No caso dos finos da pedreira de FML, observa-se que o valor da condutividade hidráulica é inferior ou igual a  $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ :

- (a) nos provetes compactados pelo método Proctor normal com 6% de bentonite;
- (b) nos provetes compactados pelo método Proctor modificado a partir de 2% de bentonite.

Nos finos da pedreira de CRV será necessário adicionar uma percentagem de bentonite superior a 6% para se obter um valor de  $k$  inferior ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s e, dessa forma, viabilizar a valorização destes resíduos em barreiras de confinamento hidráulico de obras geotécnicas com funções ambientais, em que aquele requisito seja exigido. Sällfors e Öberg-Högsta (2002) referem que a percentagem de bentonite adicionada nas misturas é habitualmente inferior a 14%, quer por razões económicas (custo da bentonite), quer por razões de engenharia (percentagens elevadas de bentonite tornam as misturas mais plásticas e mais difíceis de compactar).

## **2.6. OBSERVAÇÃO DA MICROESTRUTURA DOS PROJETES DAS MISTURAS E DOS FINOS DAS PEDREIRAS AO MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO**

### **2.6.1. Introdução**

Com o objectivo de observar de que modo as partículas de bentonite preenchem o espaço poroso nas misturas finos-bentonite compactadas pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, elaborou-se um programa para a sua observação ao microscópio electrónico. Inicialmente estava prevista a observação ao microscópio das misturas dos finos das duas pedreiras com as três percentagens em bentonite (2, 4 e 6%), antes e após a realização dos ensaios de permeabilidade, bem como dos finos sem adição de bentonite. No entanto, devido ao custo associado ao programa inicial, houve necessidade de reduzir a quantidade de observações, tendo-se optado por observar apenas as misturas dos finos das pedreiras de CRV com 6% de bentonite, antes e após a realização dos ensaios de permeabilidade, e sem adição de bentonite, apenas após compactação. Em ambos os casos, os projetos foram preparados pelos dois métodos de compactação.



Os principais objectivos do programa implementado, que o Quadro 2.21 resume, são os seguintes:

- 1) comparar a microestrutura da mistura finos de CRV+bentonite com os finos de CRV sem adição de bentonite;
- 2) comparar a microestrutura da mistura finos de CRV+bentonite antes e depois da fase de percolação nos ensaios de permeabilidade;
- 3) observar a influência do método Proctor, normal e modificado, na distribuição das partículas dos finos e da bentonite e as suas possíveis implicações na condutividade hidráulica obtida.

Quadro 2.21 - Provetes observados ao Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental.

Designação			CRV + %bentonite	
			0%	6%
Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental	Proctor normal	Antes fase percolação	✓	✓
		Após fase percolação	x	✓
	Proctor modificado	Antes fase percolação	✓	✓
		Após fase percolação	x	✓

✓ - Ensaio realizado.

x - Ensaio não realizado.

A observação da microestrutura dos seis provetes foi realizada no Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental (MEV-A) do Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP).

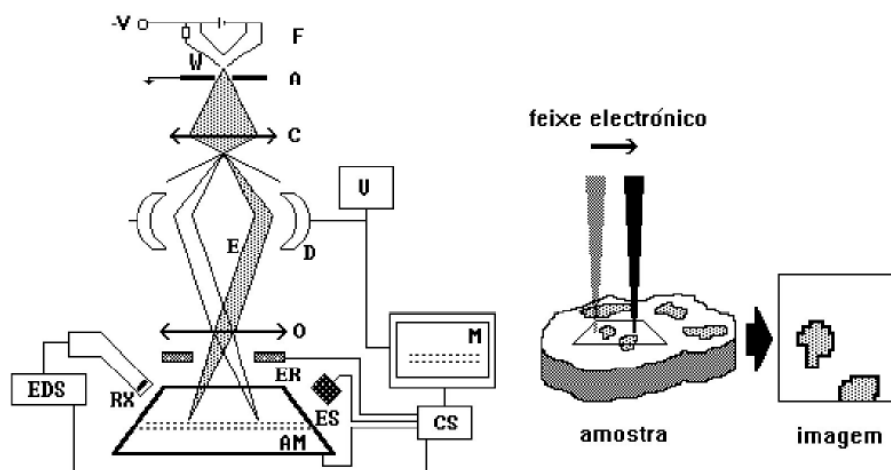
### 2.6.2. Noções básicas sobre microscopia electrónica de varrimento

O princípio de funcionamento de um microscópio electrónico de varrimento convencional (MEV) baseia-se no varrimento da superfície da amostra por um feixe electrónico finamente focado, modulando o brilho em cada ponto da imagem obtida

num monitor de visualização pela intensidade do sinal emitido pela amostra. A correspondência, ponto por ponto, entre a imagem e a região observada da amostra está, no entanto, dependente da informação contida na imagem da radiação e do detector utilizado.

A estrutura do MEV (Figura 2.29) é a seguinte:

- 1) Canhão electrónico - produz um feixe de electrões com uma energia cinética controlável (de algumas centenas de eV - electrões volt a dezenas de keV - quilo electrão volt), seleccionada em função dos fenómenos ou características da amostra com interesse para a observação e análise;
- 2) Sistema óptico electromagnético - permite a obtenção, ao nível da amostra, de um feixe de diâmetro reduzido (que em alguns equipamentos pode atingir um valor mínimo inferior a um nanómetro) e de pequena abertura angular ( $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  radianos - rad), que condicionam a qualidade da imagem obtida em resolução e profundidade de campo;
- 3) Sistema de deflexão do feixe electrónico em direcções ortogonais e de forma a efectuar o varrimento da região de interesse;
- 4) Platina - suporta a amostra a observar e possibilita o seu deslocamento em translação (x,y,z) e também a sua rotação e inclinação;
- 5) Conjunto de sensores adequados à detecção das diferentes radiações emitidas pela amostra e com interesse para os modos de observação pretendidos.



ES, ER, RX – Detectores de electrões secundários, rectrodifundidos e raios X, respectivamente;

E – Feixe de electrões; AM – Amostra; V – Controlo de varrimento;

D – Bobines de deflexão; CS – Condicionamento do sinal; M – Monitor;

W – Whenelt; F – Filamento; A – Ânodo; O – Objectiva; C – Condensador.

Figura 2.29 - Esquema da estrutura do MEV e modo de operação (adaptado de Moreira de Sá, 2006).

Relativamente ao MEV, a principal diferença no modo de funcionamento do MEV-A reside na concepção do sistema de vácuo (ao nível da câmara e da coluna) e nos detectores utilizados. A utilização do MEV implica que a câmara, onde está colocada a amostra, esteja em alto vácuo. No MEV-A existem sistemas de controlo de pressão ao longo da coluna que permitem a existência de um gradiente de pressão no interior da coluna até à câmara da amostra.

Devido a esta diferença, o MEV-A permite a observação de materiais condutores ou isolantes sem a necessidade de recobrimentos e a observação de materiais hidratados, embora com menor resolução do que o MEV. Esta funcionalidade do MEV-A permitiu a observação da microestrutura dos finos das pedreiras, sem e com o tratamento da bentonite, em microamostras recolhidas nos provetes compactados pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado. A Figura 2.30 é uma vista geral do MEV-A do CEMUP, onde foram efectuadas as observações.



Figura 2.30 - Microscópio electrónico de varrimento ambiental do CEMUP.

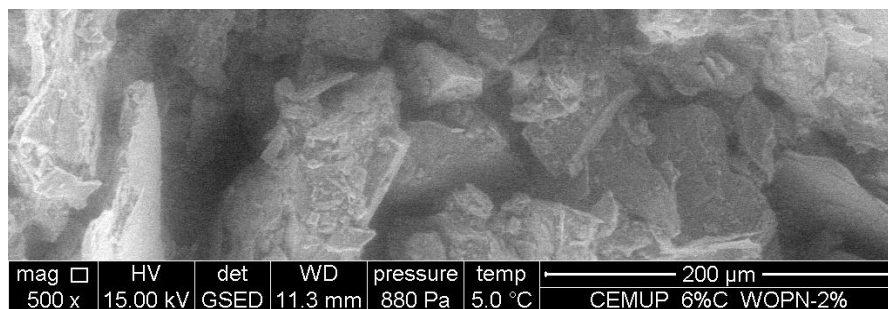


Figura 2.31 - Exemplo da informação existente nas imagens obtidas no MEV-A.

Cada imagem obtida no MEV-A apresenta, na parte inferior, uma barra horizontal com a informação seguinte (Figura 2.31):

- mag, magnitude da amplificação (por ex.: 500x);
- HV, tensão de aceleração do feixe de electrões;
- det, designação do detector (Gaseous Secondary Electron Detector);
- WD, distância de trabalho à lente objectiva;
- pressure, pressão no interior da câmara;

- temp, temperatura no interior da câmara;
- escala gráfica (por ex.: 200  $\mu\text{m}$ );
- identificação da amostra (por ex.: 0%C\_WOPN-2%).

### 2.6.3. Preparação das amostras a observar

Os dois provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade (CRV+6%bentonite, compactados pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado) só foram desmontados dos permeâmetros algumas horas antes de serem observados ao MEV-A. Relativamente aos quatro provetes não percolados (CRV+0%bentonite e CRV+6%bentonite, ambos compactados pelos métodos Proctor normal e pelo Proctor modificado), a compactação era efectuada no dia anterior ao da observação.

Todos os provetes, percolados ou não, foram envolvidos em película aderente e Parafilm® e colocados em câmara húmida.

Com o procedimento seguido pretendeu-se preservar a estrutura e o teor em água dos provetes.

No CEMUP, as películas protectoras do teor em água dos provetes eram retiradas à medida que se efectuavam as observações microscópicas. O porta-amostras do MEV-A, que se mostra na Figura 2.32 (a), só permite observar amostras de dimensão milimétrica, como a que se mostra na Figura 2.32 (b).

Antes de recolher a amostra para ser observada procedeu-se, de forma cuidada, à remoção da parte superior do provete, que poderia estar mais perturbada. Para a obtenção da pequena porção de amostra utilizou-se uma espátula de pequena dimensão, tendo havido o maior cuidado para não se perturbar a microestrutura da amostra.

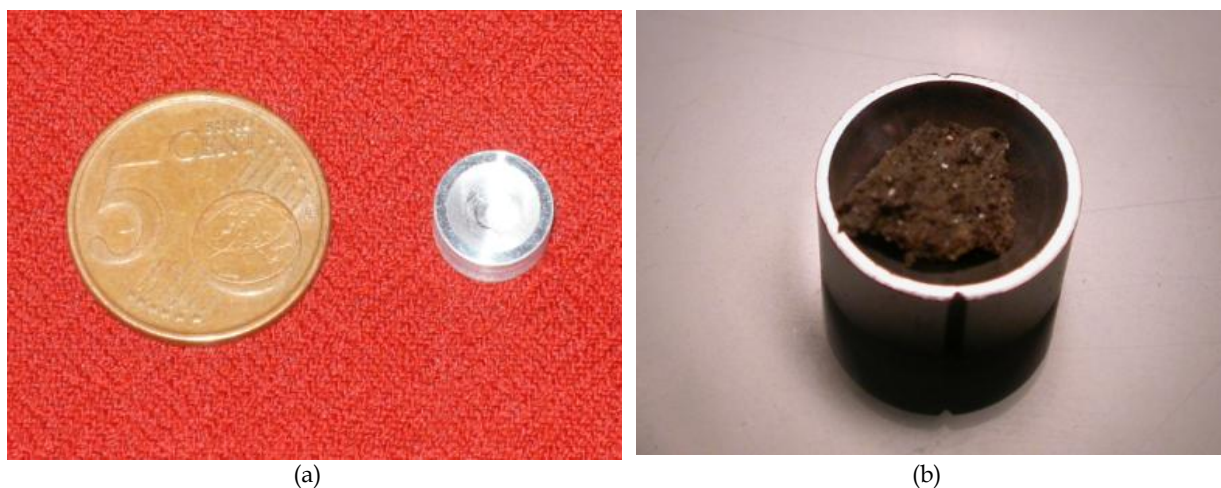


Figura 2.32 - (a) Porta-amstras; (b) amostra colocada no porta-amstras.

A Figura 2.33 mostra o interior da câmara com uma das amostras observadas.



Figura 2.33 - Vista interna da câmara com a amostra para observação.

#### **2.6.4. Observação da microestrutura**

A Figura 2.34 e a Figura 2.35 mostram a microestrutura dos provetes dos finos de CRV compactados com teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo, respectivamente, pelos métodos Proctor normal e Proctor modificado, nas condições seguintes:

- (1) sem adição de bentonite, após compactação;
- (2) com adição de 6% de bentonite, após compactação;
- (3) com adição de 6% de bentonite, após percolação.

As imagens da microestrutura dos provetes foram obtidas com as quatro ampliações seguintes: 500x, 1.000x, 5.000x e 20.000x. Nos casos em que as imagens não mostravam resolução satisfatória optou-se por não as apresentar.

As imagens obtidas nas ampliações 500x e 1.000x são as que permitem a melhor visualização da microestrutura dos provetes, tendo em consideração os objectivos pretendidos.

A principal diferença entre os provetes compactados com 0% e 6% de bentonite, sem percolação, é uma menor definição da forma das partículas, devido ao seu recobrimento pela bentonite, como evidencia em maior detalhe a ampliação 5.000x do provete com 6% de bentonite na Figura 2.35. Ainda que de forma menos evidente, também há um melhor preenchimento dos vazios nos provetes com 6% de bentonite.

Entre os provetes compactados e os provetes compactados e percolados, ambos com 6% de bentonite, a principal diferença é o aspecto mais “gelatinoso” das partículas de bentonite depois da percolação. A imagem que melhor evidencia este facto é a mostrada na Figura 2.35, com a ampliação 1.000x.

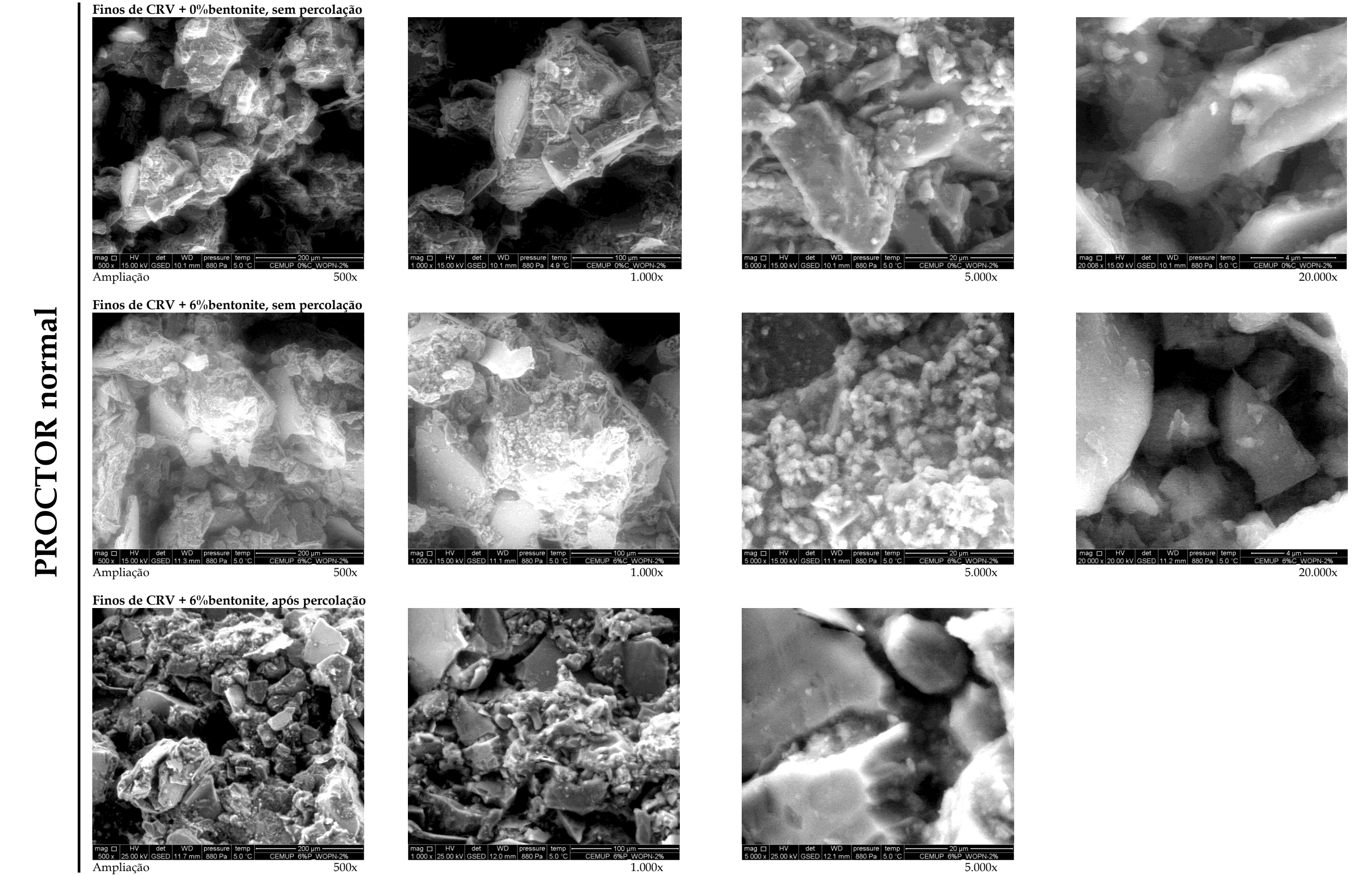
A influência da energia de compactação na microestrutura dos provetes é observável:

- 1) pelo menor índice de vazios nos provetes compactados pelo método Proctor modificado;
- 2) pela maior homogeneidade da orientação das partículas nos provetes compactados pelo método Proctor modificado.

As imagens da microestrutura dos provetes evidenciam a influência da adição da bentonite e da energia de compactação na condutividade hidráulica dos finos da pedreira de CRV, confirmando a interpretação oportunamente apresentada para os valores da condutividade hidráulica: diminuição dos vazios interpartículas acessíveis à passagem da solução percolante, devido em grande parte à expansão da bentonite durante a fase de percolação e aumento do percurso de percolação com o aumento da energia de compactação, resultante da maior homogeneidade da orientação das partículas numa direcção aproximadamente perpendicular à da percolação.

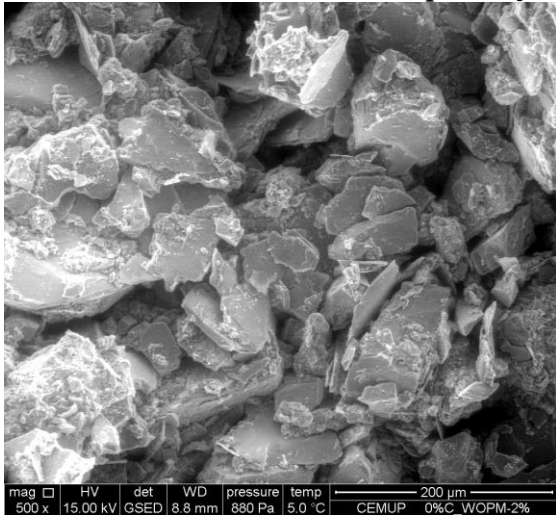




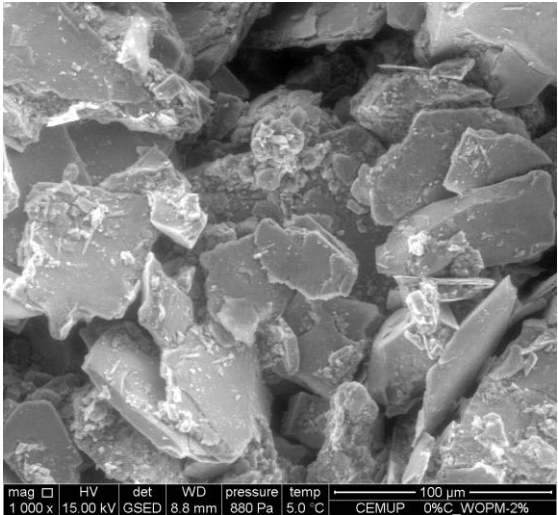




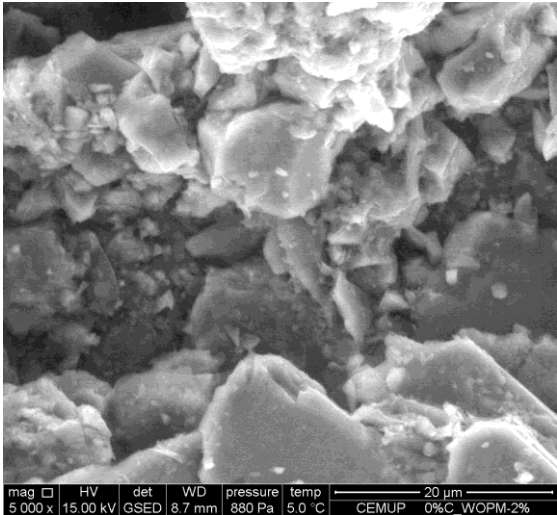
Finos de CRV + 0%bentonite, sem percolação



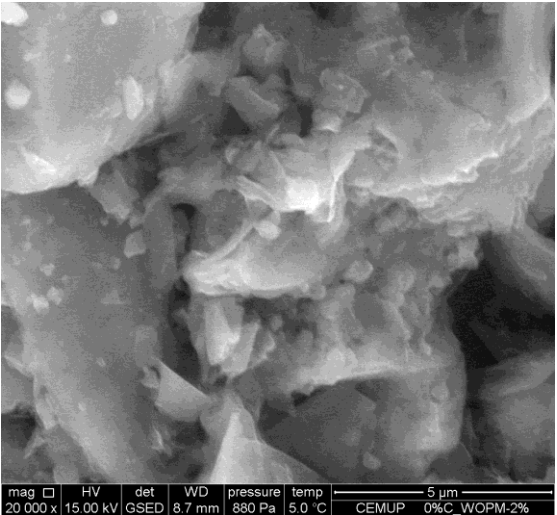
Ampliação 500x



1.000x

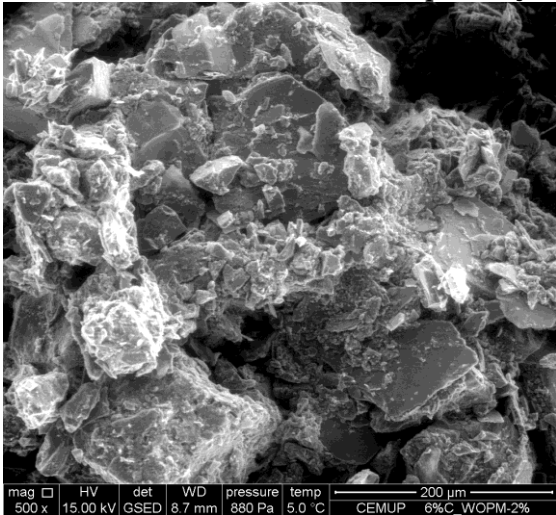


5.000x

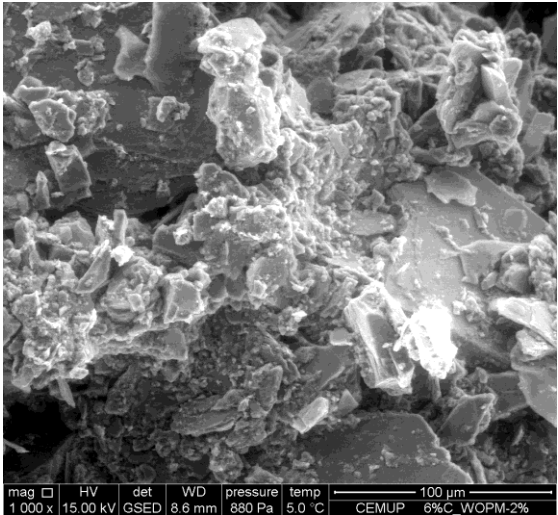


20.000x

Finos de CRV + 6%bentonite, sem percolação

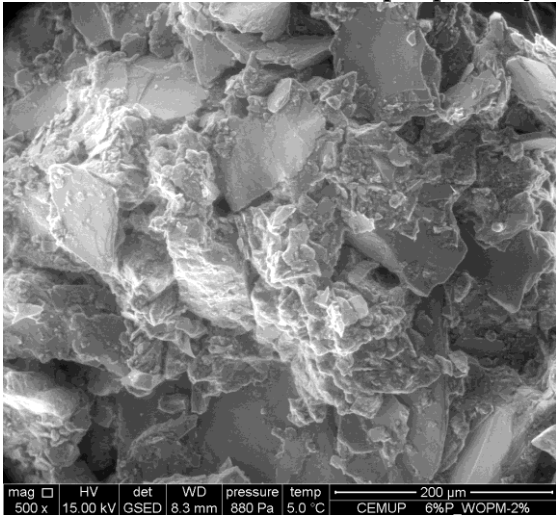


Ampliação 500x

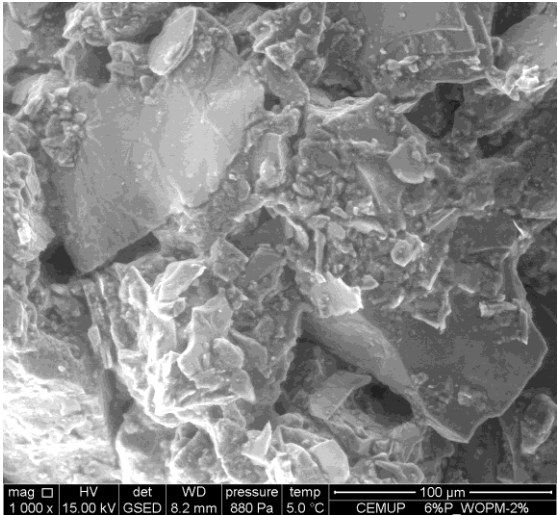


1.000x

Finos de CRV + 6%bentonite, após percolação



Ampliação 500x



1.000x

Figura 2.35 - Microestrutura dos finos de CRV e da mistura dos finos de CRV com 6% de bentonite, compactados com  $w_{opm-2\%}$ , sem e após percolação.



## 2.7. CONCLUSÕES

Neste capítulo procedeu-se à determinação das propriedades índice, físicas e hidráulicas das misturas dos finos de duas pedreiras de granito do Grupo ME situadas no norte do país, Pedreira de Moinho de Vento (Famalicão) e Pedreira da Bouça do Menino (Cervães), com 2%, 4% e 6% de bentonite sódica natural. Procedeu-se de igual modo à comparação dos valores obtidos para estas propriedades com os anteriormente obtidos com os finos das mesmas pedreiras, mas sem adição de bentonite, com o objectivo de observar se a adição de bentonite aos finos produzia modificações nas suas propriedades índice, físicas e hidráulicas. Por último, foi observada ao Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental a microestrutura dos provetes dos finos de CRV, sem e com adição de bentonite.

Tendo por base os resultados obtidos, apresentam-se em seguida as principais conclusões:

- 1) O aumento da percentagem de bentonite nas misturas de 2% para 6%, não produziu alterações significativas nas suas composições granulométricas, nem se pode concluir sobre qualquer tendência face aos resultados obtidos. Comparando estes resultados com os obtidos para os finos de FML e de CRV, verifica-se que houve um aumento da percentagem da fracção arenosa e da fracção argilosa e uma diminuição da fracção siltosa. Se o aumento da percentagem da fracção argilosa com a adição da bentonite era expectável, já o mesmo não se poderá dizer em relação ao aumento da percentagem da fracção arenosa. Uma explicação possível para este aumento é as tomas utilizadas nas análises granulométricas não terem sido exactamente iguais, em resultado de dificuldades de homogeneização e quarteamento da amostra total de FML e da de CRV;
- 2) Os resultados obtidos para os limites de consistência mostram que o aumento da percentagem de bentonite nas misturas não alterou significativamente os valores dos limites de consistência. Comparativamente com os limites de consistência

obtidos para os finos de FML e de CRV, observa-se que os finos de CRV tratados com a bentonite continuam a ser não plásticos, enquanto o índice de plasticidade,  $I_p$ , das misturas dos finos de FML com 2% e 4% de bentonite aumentou cerca de 1,3 vezes e com 6%, cerca de 1,5 vezes;

- 3) A determinação da qualidade dos finos, através do ensaio do azul de metileno, revelou em cada conjunto das misturas ensaiadas, um aumento gradual no valor de VBS à medida que aumentava a percentagem de bentonite. Ao comparar os valores de VBS obtidos para os finos de FML e de CRV, com as misturas respectivas, observa-se que para a mesma percentagem de bentonite adicionada, o aumento do valor de VBS foi proporcionalmente mais elevado nos finos de CVR do que nos finos de FML;
- 4) A expansibilidade livre das misturas aumentou com o aumento da percentagem de bentonite. Segundo a classificação de Holtz e Gibbs, o potencial de expansibilidade das misturas de FML é fraco e o das misturas de CVR é médio, com 2% e 4% de bentonite e elevado, com 6% de bentonite. Tendo em conta a composição granulométrica e a natureza dos minerais argilosos nos finos de FML e de CRV, previa-se, porém, que a expansibilidade das misturas com FML fosse superior à das misturas com CRV. Verificou-se, que a expansibilidade dos finos de CRV foi mais influenciada pela adição da bentonite do que a expansibilidade dos finos de FML. Neste aspecto, o comportamento seguiu o comportamento observado no ensaio do azul de metileno;
- 5) Relativamente ao teor em água óptimo as alterações mais importantes ocorreram nos provetes compactados pelo método Proctor normal, quando a percentagem de bentonite aumentou de 4% para 6%, nas misturas com os finos de FML, e na passagem de 2% para 4%, nas misturas com os finos de CRV. O peso volúmico seco máximo das misturas praticamente não variou com o aumento da percentagem de bentonite. Comparando os valores dos parâmetros de compactação obtidos para as misturas com os dos finos, verifica-se que praticamente não variaram. Ainda que pouco significativas, as maiores alterações ocorrem no valor de  $\gamma_{dmax}$  da mistura dos finos de CRV com 6% de bentonite,

compactada pelo método Proctor modificado e nos valores de  $w_{opn}$  e  $w_{opm}$  da mistura dos finos de FML com 6% de bentonite;

- 6) Os valores obtidos para a condutividade hidráulica das misturas dos finos de FML com a bentonite indicam que em ambas as energias de compactação, ou seja Proctor normal e Proctor modificado, se observa uma diminuição da condutividade hidráulica com o aumento da percentagem de bentonite e que o aumento da percentagem de bentonite diminuiu a importância da energia de compactação na condutividade hidráulica das misturas. No que se refere aos resultados obtidos com as misturas de CRV com a bentonite, verifica-se, em ambas as energias de compactação, uma diminuição da condutividade hidráulica com o aumento da percentagem de bentonite, ainda que muito ligeira, e que a influência da energia de compactação aumenta com o aumento da percentagem de bentonite, contrariamente ao observado com FML;
- 7) Verifica-se que a maior influência no valor da condutividade hidráulica resultante do tratamento dos finos das pedreiras com a bentonite, ocorreu nos finos de FML. Com efeito, nestes, o valor de  $k$  diminuiu cerca de 19 vezes, do provete compactado pelo método Proctor normal sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite e cerca de 53 vezes do provete compactado pelo método Proctor modificado sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite. Nos finos da pedreira de CRV, a diminuição foi de apenas de 6,7 e 5,7 vezes, respectivamente;
- 8) Nas misturas dos finos da pedreira de CRV com a bentonite, as percentagens de bentonite adicionadas não permitiram a obtenção de valores de  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. No caso das misturas de FML com 6% de bentonite, compactadas pelo método Proctor normal, e nas misturas de FML com 2%, 4% e 6% de bentonite, compactadas pelo método Proctor modificado, obtiveram-se valores de  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. Assim, estas misturas podem ser aplicadas, por exemplo, na construção de barreiras de confinamento hidráulico de aterros de resíduos perigosos e não perigosos, enquanto



as misturas dos finos de CRV com a bentonite só podem ser aplicadas, por exemplo, na construção de barreiras de confinamento hidráulico de aterros de resíduos inertes;

- 9) As imagens da microestrutura dos provetes ao MEV-A evidenciaram a influência da adição da bentonite e da energia de compactação na condutividade hidráulica dos finos da pedreira de CRV (não se observou a microestrutura dos provetes de FML ao MEV-A), traduzida pela diminuição dos vazios interpartículas acessíveis à passagem da solução percolante, devido em grande parte à expansão da bentonite durante a fase de percolação e ao aumento do percurso de percolação com o aumento da energia de compactação, resultante da maior homogeneidade da orientação das partículas numa direcção aproximadamente perpendicular à da percolação.

## **CAPÍTULO 3.**

# **CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS**

Actualmente, as políticas ambientais privilegiam a prevenção, a reutilização e a valorização dos resíduos em detrimento da sua eliminação em aterro, razão pela qual, com a presente dissertação pretende-se contribuir para a reciclagem dos finos de pedreiras através da sua aplicação em obras geotécnicas com funções ambientais e, desta forma, implementar a adopção de práticas de construção sustentável nestas obras e incentivar a sua prática, pelo exemplo, noutras obras de engenharia civil.

O interesse pelo melhoramento da capacidade de confinamento hidráulico dos finos de pedreira estudados com a adição de pequenas percentagens de bentonite sódica natural, resulta de estudos anteriores terem evidenciado que a condutividade hidráulica dos finos era baixa, mas não o suficiente para viabilizar a sua aplicação na construção de barreiras de confinamento hidráulico onde o requisito mínimo exigido fosse  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. Para além disso, a consulta da bibliografia internacional especializada mostrou que não existem estudos sobre a reciclagem de misturas de finos de pedreira com bentonite tendo em vista a sua aplicação na construção de barreiras de confinamento hidráulico, embora existam sobre misturas de areias com bentonite para o mesmo fim. Assim, considerando os pressupostos apresentados, trata-se de um trabalho que para além do seu grande interesse actual é pioneiro.

Os principais objectivos do programa experimental desenvolvido foram: o estudo do comportamento hidráulico dos finos de duas pedreiras (Pedreira do Moinho de

Vento, em Famalicão e Pedreira da Bouça do Menino, em Cervães) tratados com pequenas percentagens (2%, 4% e 6%) de uma bentonite sódica natural; a análise do melhoramento da capacidade de confinamento hidráulico das misturas dos finos das pedreiras com a bentonite, comparativamente com a dos finos das pedreiras sem adição de bentonite; e a avaliação da viabilidade da utilização das misturas finos-bentonite em estruturas de confinamento de resíduos, como é o caso dos aterros de resíduos e de áreas contaminadas, como é o caso das áreas mineiras degradadas.

As principais conclusões retidas da avaliação do desempenho hidráulico das misturas finos de pedreira + bentonite estudadas são apresentadas seguidamente:

- a) nos finos da Pedreira de Famalicão existe uma diminuição da condutividade hidráulica com o aumento da percentagem de bentonite, quer nos provetes compactados pelo método Proctor normal quer nos compactados pelo método Proctor modificado, tendo o aumento da percentagem de bentonite nas misturas diminuído a importância da energia de compactação na condutividade hidráulica das mesmas;
- b) nas misturas dos finos da Pedreira de Cervães com a bentonite, há diminuição da condutividade hidráulica destas com o aumento da percentagem de bentonite, ainda que muito ligeira, em ambas as energias de compactação, e a influência da energia de compactação aumenta com o aumento da percentagem de bentonite, contrariamente ao observado com as misturas da Pedreira de Famalicão;
- c) a maior influência no valor da condutividade hidráulica resultante do tratamento dos finos das pedreiras com a bentonite, ocorreu nos finos da Pedreira de Famalicão, tendo o valor de  $k$  diminuiu cerca de 19 vezes, do provete compactado pelo método Proctor normal sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite e cerca de 53 vezes do provete compactado pelo método Proctor modificado sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite;

- d) nos finos da Pedreira de Cervães, a diminuição do valor da condutividade hidráulica do provete compactado pelo método Proctor normal sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite foi de apenas de 6,7 vezes e cerca de 5,7 vezes do provete compactado pelo método Proctor modificado sem adição de bentonite para o provete compactado com a mesma energia e adição de 6% de bentonite;
- e) nas misturas dos finos da Pedreira de Famalicão com 6% de bentonite, compactadas pelo método Proctor normal, e nas misturas dos finos da mesma pedreira com 2, 4 e 6% de bentonite, compactadas pelo método Proctor modificado, obtiveram-se valores de  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s, o mesmo não acontecendo nas misturas dos finos da Pedreira de Cervães com a bentonite, onde os valores obtidos para a condutividade hidráulica foram superiores a  $1 \times 10^{-9}$  m/s;
- f) a observação da microestrutura dos provetes ao Microscópio Electrónico de Varrimento Ambiental evidenciaram a influência da adição da bentonite e da energia de compactação na condutividade hidráulica dos finos da pedreira de CRV (não se observou a microestrutura dos provetes de FML ao MEV-A), traduzida pela diminuição dos vazios interpartículas acessíveis à passagem da solução percolante, devido em grande parte à expansão da bentonite durante a fase de percolação e ao aumento do percurso de percolação com o aumento da energia de compactação, resultante da maior homogeneidade da orientação das partículas numa direcção aproximadamente perpendicular à da percolação.

Em síntese, a investigação efectuada evidenciou que os finos da Pedreira de Famalicão podem ser valorizados em obras geotécnicas com funções ambientais onde se exijam valores de condutividade hidráulica inferiores ou igual a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, se tratados com a adição de pequenas percentagens de bentonite sódica natural e compactados com energias equivalentes às do Proctor normal e do Proctor modificado. Dentre este tipo de obras, cita-se, a título de exemplo, o caso das barreiras de confinamento hidráulico de aterros de resíduos perigosos e não perigosos. As misturas dos finos da Pedreira de

Cervães com as percentagens de bentonite utilizadas só podem, porém, ser valorizados na construção de barreiras de confinamento hidráulico de aterros de resíduos inertes ou em obras que não requeiram valores de  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s, como é o caso do revestimento de canais para rega.

Tendo por base a recolha e a análise bibliográfica e a investigação experimental efectuada nesta dissertação, sugerem-se, nos pontos seguintes, futuras linhas de investigação.

- 1) Dada a dificuldade da obtenção de valores consistentes nas análises granulométricas efectuadas nas misturas dos finos das pedreiras com a bentonite sódica natural (aumento da percentagem da fracção arenosa com o aumento da percentagem da bentonite), em princípio devido à formação de agregados de bentonite com os finos, sugere-se a realização de análises granulométricas com as misturas utilizadas neste estudo para diferentes quantidades do desfloculante empregue, bem como a realização das mesmas análises com outros desfloculantes que estejam disponíveis comercialmente. Em função dos resultados obtidos, seria elaborado um protocolo que contemplasse os procedimentos a seguir na realização das análises granulométricas a este tipo de materiais.
- 2) Adição de maiores percentagens de bentonite aos finos da pedreira de Cervães, de modo a avaliar se a condutividade hidráulica das misturas obtida nestas condições passa a ser de valor inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, o que permitiria viabilizar a reciclagem destes finos na construção de barreiras de confinamento hidráulico de aterros de resíduos não perigosos e perigosos. Propõe-se a utilização de percentagens de 8, 10 e 12% de bentonite sódica natural. Por razões económicas (custo da bentonite) e de engenharia (percentagens elevadas de bentonite tornam as misturas mais plásticas e mais difíceis de compactar), não se devem utilizar percentagens de bentonite superiores a 15%.
- 3) Atendendo a que nas obras geotécnicas com funções ambientais os materiais estudados normalmente serão solicitados por lixiviados ou outras soluções

aquosas quimicamente agressivas, entende-se que seria pertinente implementar um programa de investigação que contemplasse o estudo da condutividade hidráulica das misturas dos finos das duas pedreiras com bentonite, utilizando como percolantes, lixiviados preparados em laboratório ou lixiviados recolhidos directamente em aterros de resíduos, por existirem estudos que indicam que a condutividade hidráulica da mistura de areia com bentonite, em particular a sódica, pode aumentar em contacto directo com estas soluções e ser várias ordens de grandeza maior do que à água desmineralizada.

- 4) Realização de trechos experimentais com misturas de finos de pedreira e bentonite, para comparação do seu desempenho hidráulico com o observado em estudos laboratoriais. Na realização destes trechos experimentais, deve haver especial atenção na preparação e na homogeneização da mistura e nos trabalhos de compactação.
- 5) Sensibilizar a administração central, os donos de obra, os projectistas e os empreiteiros, para a oportunidade e a importância ambiental, e igualmente económica, da valorização deste tipo de materiais, que contribuirá para a implementação de práticas de construção sustentável nas obras de engenharia civil, em geral, e geotécnicas, em particular.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHOU, T., BENSON, C.H., EDIL, T.B. Micro-structure and hydraulic conductivity of simulated sand-bentonite mixtures. *Clays and Clay Minerals*, 2002, vol. 50, nº 5, pp. 537-545.
- ALSTON, C., DANIEL, D.E., DEVROY, D.J. Design and construction of sand-bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, vol. 34, pp. 841-852.
- ALTHER, G.R. The qualifications of bentonite as a soil sealant. *Engineering Geology*, 1987, vol. 23, pp. 177-191.
- AMETA, N.K., WAYAL, A.S. Effect of bentonite on permeability of dune sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, vol. 13, bund. A, p. 7.
- ASTM Standard D2487, 1998, *Practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. In Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08. Edited by ASTM, Philadelphia: ASTM, 1999, pp. 220-230.
- ASTM Standard D5856, 1995 (2007), *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, DOI: 10.1520/D5856-95R07, p. 8, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., CHAPUIS, R.P. Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, vol. 33, pp. 470-482.
- BENSON, C.H., DANIEL, D.E. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1990, vol. 116, nº 8, pp. 1231-1248.
- BONAPARTE, R., DANIEL, D.E. & KOERNER, R.M. *Assessment and recommendations for improving the performance of waste containment systems*,



EPA/600/R-02/099, U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH. (2002).

**BOSCOV, M.E.G., SOARES, V., VASCONCELOS, F.D.** Geotechnical properties of a silt-bentonite mixture for liners construction. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 2009, pp. 217-220.

**BUETTNER, W.** Bentonite seepage control barriers. *The First Canadian Engineering Technology Seminar on "The use of bentonite for civil engineering application"*, 1985, pp. 22-31.

**CAVALCANTE ROCHA, J.** *Traitement des sables à la bentonite pour la constitution de la barrière de sécurité passive des centres de stockage de déchets*. Thèse Génie Civil - Sols: INSA, 1995. p. 222.

**CHALERMYANONT, T., ARRYKUL, S.** Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2005, vol. 27, n° 2, pp. 313-323.

**CHAPUIS, R.P.** Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, vol. 27, pp. 47-57.

**CHAPUIS, R.P.** The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, vol. 39, pp. 417-439.

**CHAPUIS, R.P., MARCOTTE, D., AUBERTIN, M.** Discussion of "Network model for hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures". *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, vol. 43, pp. 110-114.

**D'APPOLONIA, D.** Soil-bentonite slurry trench cutoffs. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1980, vol. 106, n° GT4, pp. 399-417.

**DANIEL, D.E.** Predicting hydraulic conductivity of clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1984, vol. 110, nº 2, pp. 285-300.

**DAS, B.M.** *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, Thomson, 2007, p. 562.

**Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto** – Estabelece o regulamento da deposição de resíduos em aterro, as características técnicas e os requisitos a observar na concepção, licenciamento, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros. Diário da República I Série, Nº153/2009.

**EGLOFFSTEIN, T.A.** Natural bentonites – influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonite used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, vol. 19, pp. 427-444.

**EID, M.M., ABDELRAHMAN, M.T., ABDEL-AAL, F.M.B.** Sand bentonite mixture as a secondary liner in landfills. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 2009, pp. 225-228.

**Especificação LNEC E 196-1966** - Solos: Análise Granulométrica. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1966, Lisboa, Portugal,

**Especificação LNEC E 197-1996** - Solos: Ensaio de Compactação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1996, Lisboa, Portugal

**Especificação LNEC E 200-1967** - Solos: Ensaio de Expansibilidade. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967, Lisboa, Portugal.

**Especificação LNEC E 203-1967** - Solos: Determinação do pH. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1967, Lisboa, Portugal.

**Especificação LNEC E 219-1968** - Prospecção Geotécnica de Terrenos: Vocabulário. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1968, Lisboa, Portugal.

**Especificação LNEC E 240-1970** - Solos: Classificação para Fins Rodoviários. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1970, Lisboa, Portugal.

**FERNANDES, M.M.**, *Mecânica dos Solos*, I Volume, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1994, p. 251.

**FRIAS, A., ROQUE, A.J., ALMEIDA, I.M., CALDEIRA, L., ANDRADE, R., SANTOS, J.** Caracterização laboratorial de finos de pedreiras de granito visando a sua aplicação em obras geotécnicas no âmbito do Protocolo LNEC/Mota-Engil. *Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, 2008, pp. 269-276.

**GLEASON, M.H., DANIEL, D.E., EYKHOLT, G.R.** Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, vol. 123, nº 5, pp. 438-445.

**GOMES, C.F.** *Argilas. O que são e para que servem?*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1986, p.457.

**GUEDDOUDA, M.K., LAMARA, M., ABOUBAKER, N., TAIBI, S.** Hydraulic conductivity and shear strength of dune sand-bentonite mixtures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, vol. 13, bund. H, p. 15.

**HASSANEIN, Z.S., BENSON, C.H., WANG, X., BLOTZ, L.R.** Determining bentonite content in soil-bentonite mixtures using electrical conductivity. *Geotechnical Testing Journal*, 1996, vol.19, nº1, pp. 51-57.

**HEINECK, K.S., CONSOLI, N.C., BICA, A.V.D., FLORES, J.A.A.** Comportamento de misturas de cinza de carvão-bentonita e areia-bentonita. *Geotecnia – Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 2003, nº 99, pp. 33-52.

**ISSMGE** Lexicon in 8 languages. 5<sup>th</sup> edition. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), 1981, p. 245.

- KENNEY, T.C., van VEEN, W.A., SWALLOW, M.A., SUNGAILA, M.A.** Hydraulic conductivity of compacted bentonite sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, vol. 29, pp. 364-374.
- KOMINE, H.** Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites. *Engineering Geology*, 2004, vol. 71, n° 3-4, pp. 265-279.
- KOMINE, H., OGATA, N.** Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. *Soils and Foundations*, 1999, vol. 39, n° 2, pp. 83-97
- LAMBE, T.W.** The permeability of compacted fine-grained soils. In *ASTM STP 163*. Philadelphia: ASTM, 1954, pp. 56-67.
- LAMBE, T.W.** The structure of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 1958, vol. 84, n° SM2, pp. 1654(1)-1654(34).
- LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V.** *Soil Mechanics*, SI version, John Wiley & Sons, New York, 1979, p. 553.
- LNEC** *Caracterização Experimental de uma Bentonite Sódica Industrial*, Relatório. 408/2007 – Departamento de Geotecnia/Núcleo de Túneis, p. 30.
- LNEC** *Protocolo de Cooperação Técnica e Científica – LNEC / Grupo Mota-Engil: Valorização de Finos de Pedreiras de Granito em Obras Geotécnicas*. A publicar.
- LUCAS, F.J.F.** Propriedades e comportamento das bentonites quando utilizadas em infra-estruturas ambientais. *Actas do 7º Congresso Nacional de Geotecnia*, Porto, Portugal, 2000, pp. 1189-1197.
- LUKIANCHUKI, J.A.** *Influência do teor de bentonite na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante*. Tese de Mestrado em Geotecnia, EESC/USP, 2007. p. 124.

- LUKIANCHUKI, J.A., ESQUIVEL, E.R.** Avaliação do comportamento da condutividade hidráulica em misturas de solo-bentonita. *Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, 2008, pp. 285-292.
- MAGISTRIS, F.S., SILVESTRI, F., VINALE, F.** Physical and mechanical properties of a compacted silty sand with lox bentonite fraction. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, vol. 35, pp. 909-925.
- MARCOTTE, D., MARRON, J.C., FAFARD, M.** Washing of bentonite in laboratory hydraulic-conductivity tests. *Journal of Environmental Engineering*, 1994, vol. 120, nº 3, pp. 691-698.
- MINEIRO, A.J.C.,** *Mecânica dos Solos e Fundações – Origem e Classificação dos Solos*, Universidade Nova de Lisboa, 1981, p.102.
- MITCHELL, J.K., HOOPER, D.R., CAMPANELLA, R.G.** Permeability of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 1965, vol. 91, nº SM4, pp. 41-65.
- MONTAÑEZ, J.E.C.** *Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures*. Degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering, University of London, 2002. p. 380.
- MOREIRA DE SÁ, C.P.** *Caracterização morfológica, microestrutural e microanalítica de materiais por: microscopia electrónica de varrimento – SEM e microanálise por raios X – EPMA: EDS/WDS*. CEMUP, 2006. p. 61.
- MOUSSAI, B.** *Etude en laboratoire du compactage statique et de la perméabilité des sols fins argileux*. Thèse Génie Civil – Sols, INSA, 1993. p. 253.
- NF P 94-068** – *Mesure de la Capacité d’adsorption de Bleu de Méthylène s’un Sol ou d’un Matériau Rocheux*. Association Française de Normalisation, Paris, France, 1998.

**Norma Portuguesa NP-84** – Teor de um Provete de Solo em Humidade. IGPAI, Repartição de Normalização, Lisboa, Portugal, 1965.

**Norma Portuguesa NP-143** – Solos: Determinação dos Limites de Consistência. IGPAI, Repartição de Normalização, Lisboa, Portugal, 1969.

**POPPE, L.J., PASKEVICH, V.F., HATHAWAY, J.C., BLACKWOOD, D.S.** A *Laboratory Manual of X-Ray Powder Diffraction*, 2001. In <http://www.usgs.gov>, acedido em Setembro de 2010.

**OLSEN, H.W.** Hydraulic flow through saturated clays. *Proceedings of the 9th National Conference on Clays and Clay Minerals*, 1962, pp. 131-161.

**ROQUE, A. J.** *Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barrièrs d'étancheité Minerals Presents dans les Centres de Stockage de Dechets. Application aux sols fins portugais*. Thèse de Doctorat Génie Civil – Sols, INSA, 2001. p. 697.

**ROQUE, A. J., ANDRADE, R., FRIAS, A., CALDEIRA, L., VIEIRA, A., ALMEIDA, I.M., FORTUNATO, E.** Protocolo LNEC/Mota-Engil para uma gestão sustentável dos finos de pedraira gerados na produção de agregados. *Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, 2008, pp. 261-268.

**SÄLLFORS, G., ÖBERG-HÖGSTA, A.** Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2002, vol. 20, pp. 65-80.

**SERRA, J.B., AMADE, K., GALHANO, C.** Estudos de caracterização de uma bentonite sódica. *Actas do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*, Coimbra, Portugal, 2008, p. 8.

**SHACKELFORD, C. D.** Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity. In *Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil*, ASTM STP 1142. Edited by David E. Daniel and Stephen J. Trautwein, Philadelphia: ASTM, 1994, pp. 111-168.

- SIVAPULLAIAH, P.V., SRIDHARAN, A., STALIN, V.K.** Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, vol. 37, pp. 406-413.
- STUDDS, P.G., STEWART, D.I., COUSENS, T.W.** The effects of salt solutions on the properties of bentonite-sand mixtures. *Clay Minerals*, 1998, vol. 33, pp. 651-660.
- VELHO, J., GOMES, C., ROMARIZ, C.** *Minerais Industriais: Geologia, Propriedades, Tratamentos, Aplicações, Especificações, Produções e Mercados*, Gráfica de Coimbra, LDA, 1998, p. 592.
- YANFUL, E.K., SHIKATANI, K.S.** Compatibility of a sand-bentonite mixture with acid rock drainage. *Proceedings of the Conference on Mining and the Environment*, Sudbury, Ontario, Canada, 1995, pp. 623-632.